

Sonja Juntunen

**VÄYLÄHANKKEIDEN  
KUIVATUSSUUNNITTELU  
MALLINTAMALLA**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Elokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Sonja Juntunen: Väylähankkeiden kuivatussuunnittelu mallintamalla  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikan DI-tutkinto-ohjelma  
Elokuu 2019

---

Rakentaminen ja ilmastonmuutos vaikuttavat veden luonnolliseen kiertokulkuun. Riski rakentamisen seurauksena syntyvien hulevesien tulvimiselle lisääntyy ilmastonmuutoksen lisätessä rankkasateiden määrää Suomessa. Väylien kuivatussuunnittelussa väylän kuivatus on turvattava rakenteiden kestävyys ja liikenneturvallisuuden takia, ja lisäksi hulevedet on hallittava niin, että ne eivät aiheuta haittaa ympäristölle. Väylien kuivatusjärjestelmät mitoitetaan Väyläviraston Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu -ohjeen mukaisesti. Kuivatusrakenteiden, esimerkiksi rumpujen, hydraulinen mitoitus perustuu mitoitusapahtuman eli joko rankkasateen tai lumien sulamisen aiheuttamaan huippuvirtaamaan. Huippuvirtaamaan vaikuttaa mitoitusapahtuman lisäksi valuma-alueen ominaisuudet. Rankkasateen aiheuttaman huippuvirtaaman laskentaan käytetään ohjeen mukaan rationaalista menetelmää.

Suomessa ja Pohjoismaissa on tunnustettu tarve kehittää mitoituskäytäntöjä tietokoneavusteilla mallinnustyökaluilla, jotta tienpidossa kyettäisiin sopeutumaan ilmastonmuutoksen vaikutuksiin. Työn tavoitteena oli 1) vertailla rationaalista menetelmää ja Storm Water Management Model (SWMM) -menetelmää laskettuja valutamallinnuksen tuloksia, 2) selvittää, voidaanko mallinnusohjelmalla suorittaa Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu -ohjeen mukaisesti esimerkkikohteiden kuivatusjärjestelmien mitoitus sekä 3) selvittää mitä hyötyjä mallinnuksella ja SWMM-menetelmällä voidaan saavuttaa verrattuna nykyohjeistuksen mukaiseen kuivatussuunnitteluun.

Työssä tutkittiin mallinnusohjelmalla valunta- ja virtausmallien käyttöä väylien kuivatussuunnittelussa esimerkkikohteiden avulla. Esimerkkikohteina ovat lentokoneen varalaskupaikka moottoritillä sekä moottoritien eritasoliittymä pohjavedensuojausalueella. Valutamallinnuksessa käytettiin mallinnusmenetelmänä rationaalista menetelmää ja SWMM-menetelmää. Virtausmallinnus toteutettiin käyttäen laskentamenetelmänä dynaamista aaltoyhtälöä.

Kuivatusrakenteiden mitoituksessa tarvittava huippuvirtaama kyettiin laskemaan mallinnusohjelmalla sekä rationaalista menetelmää että SWMM-menetelmää käyttäen. Huippuvirtaamat lentokoneen varalaskupaikan valuma-alueelta olivat samaa suuruusluokkaa rationaalilla menetelmällä ja SWMM-menetelmällä laskettuina. Osavaluma-alueittain eroja menetelmien välillä kuitenkin esiintyi. Huleveden määrän laskentaan rationaalinen menetelmä soveltui vain tietyin rajoituksin.

Kuivatusjärjestelmien mitoitus mallinnusohjelmalla ei onnistu täysin nykyisen ohjeistuksen mukaisesti johtuen esimerkiksi laskennallisista eroista ohjeistuksen ja mallinnusohjelman välillä. Rumpujen mitoituksessa käytettäviä mitoituspadotuskorkeuksia voidaan kuitenkin vertailla virtausmallilla laskettuihin solmupisteiden maksimivedenkorkeuksiin, ja ohjeistuksen mukaisia mitoitusasteita voidaan käyttää mallinnusohjelmalla.

Valuma-alueilta muodostuneiden valuntojen ja kuivatusjärjestelmissä tapahtuneiden virtaus-ten mallintaminen onnistui molemmissa esimerkkikohteissa, kun käytettiin SWMM-menetelmää. SWMM-menetelmällä pystytään ottamaan valuma-alueen ominaisuudet tarkemmin huomioon, kuin rationaalilla menetelmällä. Mallinnuksella ja SWMM-menetelmällä pystyttiin tarkastelemaan vaihtuvan intensiteetin mitoitusasteita ja monimutkaisia kuivatusjärjestelmiä. Erilaisia mitoitusasteita ja mitoitusvaihtoehtoja (eri rumpukoot) oli helppo tarkastella mallinnusohjelman avulla. Myös kuivatusjärjestelmän kapasiteetin ylittyminen oli havaittavissa ohjelmasta esimerkiksi visuaalisesti, ja laskennan tuloksia pystyttiin tarkastelemaan hyvin monipuolisesti.

Avainsanat: Rationaalinen menetelmä, SWMM, hulevesien mallinnus, kuivatusrakenteiden mitoitus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Sonja Juntunen: Highway Drainage Design Using Storm Water Modeling  
Master thesis  
Tampere University  
Environmental and Energy Engineering, MSc  
August 2019

---

Construction and the climate change affect the natural cycle of water. The risk of the flooding of construction-caused storm water increases as climate change increases the frequency of high-intensity rains in Finland. Drainage of highway is important to ensure the road safety and durability of highway structures. In addition, it is important to manage storm water so that any harm to the environment is prevented. Drainage systems of highways are designed following the instructions given by the Finnish Transport Infrastructure Agency. Hydraulic design shall be based on the peak flow of whether a high-intensity rain or snowmelt water. Additionally, characteristics of catchment area affect runoff caused by rain or snowmelt. According to the instructions the rational method shall be used to calculate the peak flow.

To adapt to the effects of climate change in road maintenance, design methods need to be further developed using modeling tools, as noticed by experts in Finland and other Nordic countries. The goal of this thesis work was to 1) compare the results of the hydrologic model calculated using rational method and SWMM, 2) figure out whether modeling software can be used to design drainage systems of example cases in accordance with the instructions given by the Finnish Transport Infrastructure Agency and 3) find out what advantages modeling and SWMM can provide in comparison to the design methods suggested by the aforementioned instructions.

In this thesis work, the use of both hydrologic and hydraulic models in highway drainage design were examined with the assistance of a modeling software. There are two case examples: 1) an aircraft emergency landing strip on a motorway and 2) a motorway interchange at groundwater protection area. Rational method and SWMM were used in hydrologic model, and dynamic wave analysis was used in calculations of the hydraulic model.

Both the rational method and SWMM calculated successfully the peak flow, which is needed in hydraulic drainage design. The peak flows of the emergency landing strip were of the same magnitude for both methods. However, there were differences between the two methods when individual subbasins were inspected. The rational method was found to have some limitations when applied to calculating the volume of storm water.

Using modeling software, it is not possible to design drainage systems completely in accordance with the instructions of the Transport Infrastructure Agency. This is because of some fundamental differences in the calculation methods used by those two. However, the design backwater elevation used in designing culverts can be compared to maximum water elevations at nodes calculated using hydraulic model, and design storms given by instructions can be used in the modeling software.

The modeling of both the runoffs from catchments and the flows that occurred in the drainage systems was successful in both case examples when using SWMM method. When using SWMM, the characteristics of catchments can be taken into account more precisely than what is possible using rational method. Modeling and the SWMM method allowed the examination of variable intensity design storms and complex drainage systems. The modeling software allowed easy examination of design storms of different intensity and culverts of different size. Capacity exceedance of the drainage system can be visually detected, and calculation results can be examined very comprehensively.

Keywords: Rational method, SWMM, storm water modeling, drainage design

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Väylävirastolle Destia Oy:n palveluksessa. Haluan kiittää aiheeni ideoinnista ja työni toteuttamisen mahdollistamisesta Jaana Kalliolaaksoa Väylävirastolta ja Ville Suntiota Destia Oy:stä. Erityisesti haluan kiittää diplomi-insinööri Marja-Terttu Sikiötä Destia Oy:stä diplomityöni aihesisällön kommentoinnista ja työni ohjauksesta. Tampereen yliopistolta kiitän professori Jukka Rintalaa sekä yliopisto-opettaja Hannele Auvista, jotka toimivat työni tarkastajina. Haluan kiittää myös työkavereitani ja lähipiiriäni tuesta ja kannustuksesta.

Tampereella, 9.8.2019

Sonja Juntunen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. VEDEN KIERTOKULKU JA SEN MUUTOKSET .....	3
2.1 Veden kiertokulku.....	3
2.2 Rakentamisen vaikutukset veden kiertokulkuun .....	6
2.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset veden kiertokulkuun .....	7
3. KUIVATUSSUUNNITTELU JA KUIVATUSRAKENTEIDEN MITOITTAMINEN....	11
3.1 Väylän kuivatus ja kuivatusjärjestelmät .....	11
3.2 Hulevesien hallinnan periaatteet .....	12
3.3 Hulevesien hallintatarpeen arviointi väyläsuunnittelussa .....	14
3.4 Kuivatussuunnittelu väylähankkeiden eri vaiheissa .....	15
3.5 Kuivatus- ja hulevesijärjestelmien mitoituskäytännöt.....	16
3.5.1 Mitoitussateen kesto ja toistuvuus.....	20
3.5.2 Mitoitussateen intensiteetti.....	22
3.5.3 Sateen aiheuttaman mitoitusvirtaaman muodostumiseen vaikuttavat tekijät.....	25
3.5.4 Mitoitusvirtaaman laskenta rationaalisella menetelmällä .....	28
3.5.5 Kevätylivalumasta aiheutuva mitoitusvirtaaman laskenta ja siihen vaikuttavat tekijät.....	31
3.5.6 Avo-uomien ja rumpujen mitoitus .....	33
3.6 Hulevesien mallinnus tietokoneohjelmilla .....	35
3.6.1 Mallinnuksen tavoitteet ja mallinnusmenetelmän valinta .....	36
3.6.2 Mallinnusta koskeva ohjeistus ja tutkimus .....	37
4. AINEISTO JA MENETELMÄT .....	40
4.1 Mallinnusohjelma ja mallinnusmenetelmät .....	40
4.1.1 SWMM.....	40
4.1.2 Rationaalinen menetelmä .....	45
4.1.3 Virtausmalli .....	46
4.1.4 Mallin rakentaminen.....	47
4.1.5 Laskenta ja tulosten tarkastelu.....	48
4.2 Kohteiden kuvaus ja niiden valunta- ja virtausmallit.....	52
4.2.1 Kohde 1. Lentokentän varalaskupaikan sivuoja ja rumpu .....	53
4.2.2 Kohde 2. Eritasoliittymä pohjavedensuojausalueella .....	54
4.2.3 Valuma-alueiden määrittäminen ja mallin rakentaminen .....	56
4.2.4 Mitoitussateet.....	57
4.2.5 Valuntamallin laskentamenetelmät ja parametrit .....	58
4.2.6 Virtausmallin laskentamenetelmät ja -parametrit .....	60
5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	61
5.1 Rationaalisen menetelmän ja SWMM-menetelmän valuntamallin tulosten vertailu .....	61
5.2 Väyläviraston ohjeistuksen mukainen kuivatusjärjestelmän mitoitus...	67
5.3 Väyläviraston ohjeistukseen perustuva kuivatusjärjestelmän mitoitus SWMM-menetelmän valunta- ja virtausmallia käyttäen .....	68

5.4	SWMM-menetelmän ja mallinnuksen käytön etuja kuivatussuunnitellussa .....	69
5.4.1	Esimerkkikohteen 1 tarkastelu eri mitoitusvaihtoehdoilla käyttäen vaihtuvaintensiteettisiä sateita .....	70
5.4.2	Esimerkkikohteen 2 kapasiteetin tarkastelu vaihtuvaintensiteettisillä mitoitussateilla.....	72
5.5	Mallinnusohjelman käyttö .....	74
5.6	Mallinnustuloksiin vaikuttavat tekijät.....	75
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	77
6.1	Tulosten yhteenveto.....	77
6.2	Muut huomiot ja jatkotutkimustarpeet .....	78
7.	LÄHTEET.....	80

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

EPA	U.S. Environmental Protection Agency, Yhdysvaltain ympäristön-suojeluvirasto
FAA	Federal Aviation Agency, entinen Yhdysvaltain ilmailuhallinto
FHWA	Federal Highway Administrations, Yhdysvaltain liikenneministeriön valtateihin keskittynyt jaosto
HEC	The Hydrologic Engineering Center of the U.S. Army Corps of Engineers, Yhdysvaltain puolustusministeriön ja armeijan alaisuudessa olevan siviili- ja sotilasviraston hydrologiaan keskittynyt keskus
MTBE	Metyylitertiääributyylieetteri, bensiinin lisäaine
RCP	Representative concentration pathways, kasvihuonekaasuskenario
SCS	U.S. Soil Conservation Service, nykyään Natural Resources Conservation Service eli Yhdysvaltain maatalousministeriön elin
SSA	Storm and Sanitary Analysis -ohjelma
SWMM	EPA:n kehittämä Storm Water Management Model -mallinnusohjelma ja menetelmä
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

# 1. JOHDANTO

Väylävirasto vastaa Suomen valtion liikenneverkosta eli maanteistä, rautateistä sekä suuresta osasta vesiväyliä. Sanalla väylä tarkoitetaan tässä diplomityössä valtion maanteitä ja rautateitä. Ilmastomuutos ja sen seurauksena yleistyvät sään ääri-ilmiöt on tunnistettu merkittäväksi uhkaksi liikennejärjestelmän toimintavarmuudelle tulevaisuudessa. Ääriolosuhteiden, muun muassa myrskyjen ja tulvien ennakoitua lisääntyvän, mikä voi aiheuttaa häiriöitä, katkoksia ja vahinkoa liikenneinfrastruktuurille, sekä haitta-vaikutuksia väylien kunnolle. (Tourula et al. 2018)

Rakentaminen muuttaa merkittävästi veden luonnollista kiertoa, mistä johtuen rakennetuilla alueilla syntyy hulevesiä sateiden ja lumen sulamisen seurauksena. Väylän kuivatussuunniteluun kuuluu pinta- ja pohjavesien hallinta väyläalueella siten, että väylärakenteille ja liikenneturvallisuudelle ei aiheudu haittoja. Lisäksi kuivatussuunnittelussa varmistetaan, että ympäristön kuivatus ei esty ja ettei kuivatuksesta aiheudu haittoja ympäristölle. Kuivatussuunnittelussa otetaan huomioon väyläalueen hulevedet, väyläalueen ulkopuolelta tuleva valunta sekä väylän kanssa risteävät vesiuomat. (Liikennevirasto 2013)

Ilmastomuutoksen on ennakoitu lisäävän Suomessa sekä kokonaissademäärää että sateiden rankkuutta, mikä lisää riskiä rankkasadetulville (Saarelainen et al. 2007). Ilmastomuutos vaikuttaa myös valuntaan ja vesistöjen virtaamaan, minkä seurauksena vesistötulvariskin on ennustettu kasvavan muutamilla isoilla vesistöillä (Veijalainen ym. 2012). Tiehallinnon selvityksessä "Ilmastomuutokseen sopeutuminen tienpidossa" (Saarelainen et al. 2007) on tunnistettu tarve kehittää teiden kuivatussuunnittelua rankkasade- ja tulvatilanteita varten. Poikkeustilanteisiin voitaisiin varautua esimerkiksi selvittämällä valunta- ja virtausmalleilla rumpujen ja silta-aukkojen mitoitusta sekä eroosionsuojaus- ja viivytysjärjestelmien tarvetta (Saarelainen et al. 2007). Valunta- ja virtausmalleilla voidaan esimerkiksi tutkia jo toteutuneita rankkasadetilanteita sekä mallintaa mahdollisia ilmastomuutoksen vaikutuksia (Aaltonen et al. 2008).

Tässä diplomityössä perehdytään ensin veden kiertokulkuun ja siihen, miten ilmastomuutos ja rakentaminen siihen vaikuttavat. Seuraavaksi tutustutaan väylien kuivatus- ja hulevesijärjestelmien nykyisen ohjeistuksen mukaiseen suunnitteluun ja mitoittamiseen



sekä perehdytään mitoituksen teoreettiseen taustaan, esimerkiksi mitoitusasteiden ominaisuuksiin. Myös mallinnukseen ja siihen liittyvään ohjeistukseen ja tutkimukseen Pohjoismaissa tutustutaan.

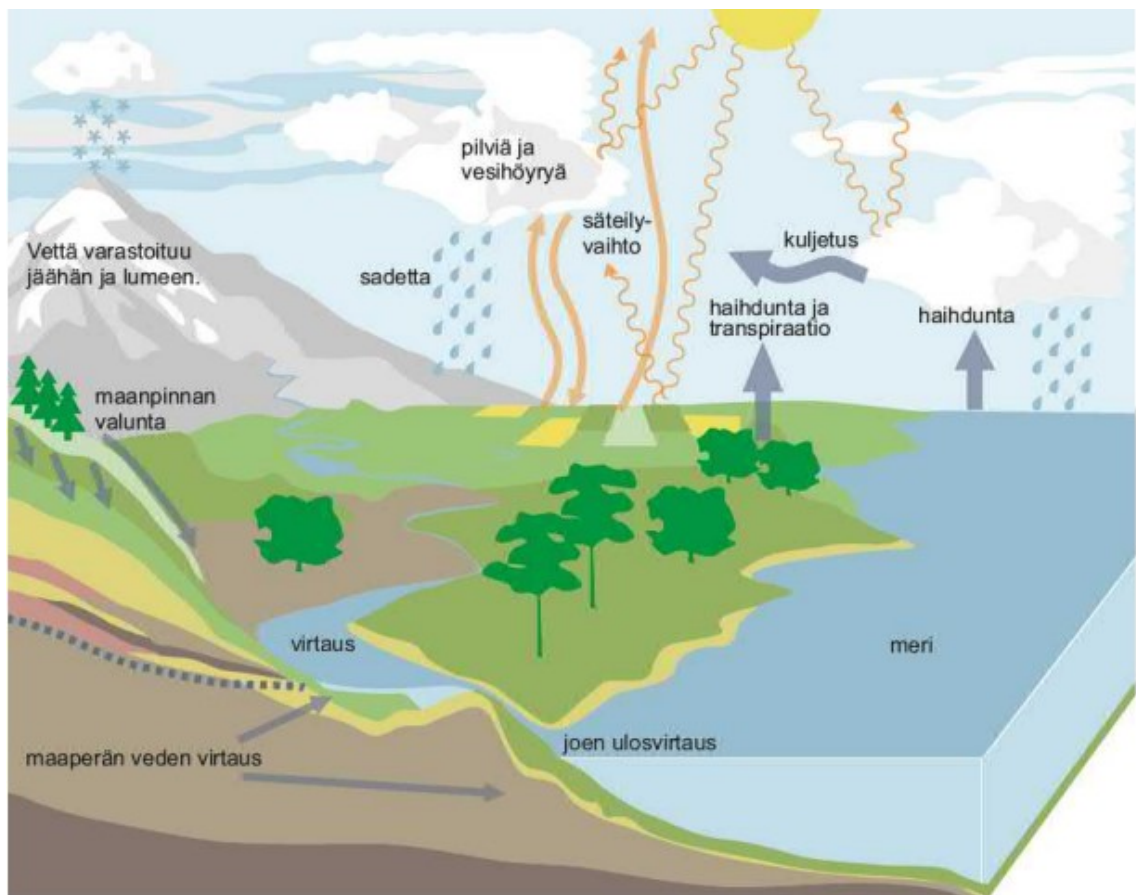
Diplomityössä tutkitaan mallinnusohjelman ja valunta- ja virtausmallien käyttöä tien kuivatussuunnittelussa esimerkkikohteiden avulla. Työn tavoitteena oli vertailla rationaalisella menetelmällä ja Storm Water Management Model (SWMM) -menetelmällä laskettuja valuntamallinnuksen tuloksia, selvittää, voidaanko mallinnusohjelmalla suorittaa Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu -ohjeen mukaisesti esimerkkikohteiden kuivatusjärjestelmien mitoitus sekä selvittää mitä hyötyjä mallinnuksella ja SWMM-menetelmällä voidaan saavuttaa verrattuna nykyohjeistuksen mukaiseen kuivatussuunnitteluun.

## 2. VEDEN KIERTOKULKU JA SEN MUUTOKSET

Tässä luvussa kuvataan veden kiertokulun perusteet ja miten ne ilmenevät Suomen olosuhteissa. Rakentaminen vaikuttaa veden luontaiseen kiertokulkuun ja siten aiheuttaa hulevesien muodostumisen. Myös ilmastonmuutoksen ennustetaan muuttavan monin tavoin veden kiertokulkua.

### 2.1 Veden kiertokulku

Veden kokonaismäärä maapallolla on vakio. Vesivarat ovat kertyneet varastoihin, joita ovat meret, ilmakehä, järvet, pohjavesi, maavesi, lumi ja jäätiköt. Kun vesi liikkuu fysikaalisten ilmiöiden seurauksena näiden varastojen välillä, syntyy hydrologinen kierto eli veden kiertokulku (kuva 1). Varastojen välistä liikkumista voidaan kuvata vuosuureina eli veden siirtymän käsiteinä. Neljä tärkeintä vuosuuretta ovat sadanta, haihdunta, valunta sekä imeytyminen. (Leppävirta et al. 2017)



**Kuva 1.** Veden hydrologinen kierto (Leppävirta et al. 2017)

Vesi haihtuu maapallon pinnalta ilmakehään vesihöyryksi, jossa se kulkeutuu ja lopulta tiivistyy vesipisaroiksi synnyttäen sateen. Sade voi olla nestemäistä tai kiinteää. Osa sateesta ei päädy maan pinnalle, vaan jää kasvien pinnalle ja haihtuu suoraan takaisin ilmakehään. Tätä kutsutaan interseptioksi. Sade muodostuu ilmakehän vesihöyryn tiivistyessä vesipisaroiksi tai härmistyessä jääksi tai lumikiteiksi synnyttäen pilviä. Pisarot ja kiteet kasvavat, kunnes painovoiman seurauksesta putoavat maahan. Sadantaa mitataan sataneen vesipatsaan paksuutena pinta-alayksikköä ja aikayksikköä kohden, esimerkiksi 1 mm/vrk sadantaa tarkoittaa yhden millimetrin kerrosta vettä neliometriä kohden vuorokaudessa. (Leppävirta et al. 2017)

Maan pinnalle satanut vesi joko haihtuu ilmakehään, imeytyy maaperään tai kulkeutuu valuntana vesistöihin. Haihtuminen tarkoittaa nestemäisen veden muuttumista vesihöyryksi. Haihtuminen edellyttää lämpöenergiaa ja turbulenssia ja lisäksi haihduttavan pinnan lähellä vesihöyryn osapaine on oltava suurempi kuin yläpuolisessa ilmassa. Haihdunta terminä pitää sisällään kaksi käsitettä, jotka ovat evaporaatio eli haihtuminen veden, maan tai kasvipeitteen pinnalta, sekä transpiraatio eli kasvien elintoiminnoista johutu haihdunta. (Leppävirta et al. 2017)

Infiltraatio tarkoittaa sadeveden imeytymistä maaperään. Imeytynyt vesi voi myös suota tautua edelleen pohjaveteen. Maaperässä päällimmäisenä on maavesikerros, jossa maapartikkelien väleissä on ilmaa ja vettä. Satanut vesi virtaa maavesikerroksessa alaspäin tai sitoutuu maaperään. Pohjavesikerros on maavesikerroksen alla oleva kokonaan vedellä kyllästynyt kerros. Maalajilla on suuri merkitys infiltraation. (Leppävirta et al. 2017)

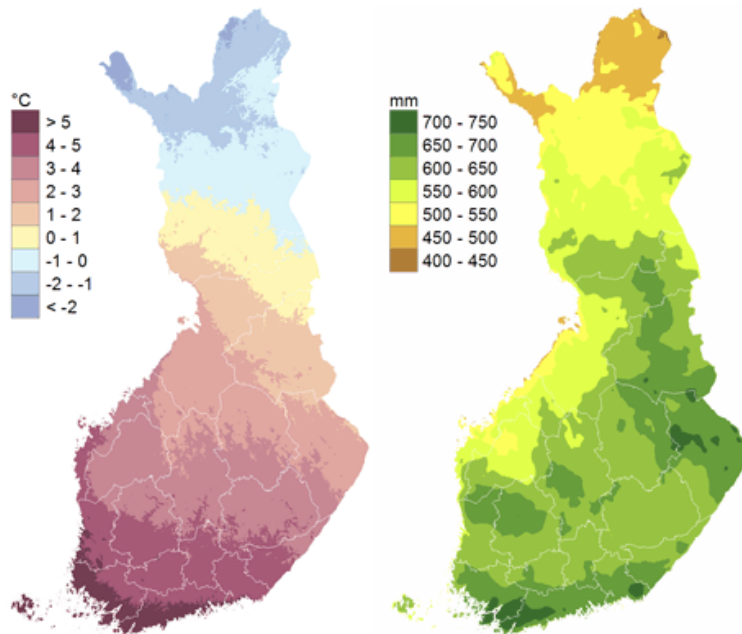
Se osa vedestä, joka ei haihdu tai imeydy, jatkaa matkaansa pintavaluntana. Pohjavesikerrokseen suotautunut vesi liikkuu pohjavesivaluntana. Valunnan saa aikaan painovoima, kun veden liikettä vastustavat kitka- ja koheesiovoimat. Valuma-alue on termi, jolla kuvataan vedenjakajien rajaamaa aluetta, jonne vesi sataa ja poistuu haihduntana ja valuntana vesistöön. Valunnan muodostumisen kannalta merkittävää on sateen kesto ja intensiteetti, jotka ovat eri sadetyypeillä erilaiset. Myös sateen ajallinen ja alueellinen jakautuminen vaikuttavat valunnan muodostumiseen. (Leppävirta et al. 2017) Myös sateen fyysinen muoto vaikuttaa valuntaan. Suomessa osa sateista sataa lumena kylmän ilmaston vuoksi ja varastoituu maan pinnalle lumipeitteeksi. Suomessa keskimäärin lumipeite paksunee kevättalvea kohden ja on paksuimmillaan maaliskuun puolivälissä. Keväällä lumien sulaminen saa aikaan kevätylivaluman. (Ilmatieteenlaitos a)

Sateet voidaan jakaa syntytapansa mukaan kolmeen tyyppiin, jotka ovat rintamasade, konvektiivinen sade ja orografinen sade. Sateen tyyppi vaikuttaa merkittävästi sateen

keston ja intensiteettiin. Rintamasateet ovat laaja-alaisia ja pitkäkestoisia ja suurin osa Suomen sateista kuuluu tähän tyyppiin. Rintamasade syntyy, kun kylmä tai lämmin säärintama törmää eri lämpöiseen ilmassaan ja lämmin ilma kohoaa kylmemmän ja painavamman ilman päälle. Kohotessaan ilma jäähtyy ja kosteus tiivistyy. Lämpimän rintaman nousuliike on hidasta ja syntyvä sade on tasaista. Kylmässä rintamassa sade taas on lämpimään verrattuna rankempaa ja ajallisesti ja alueellisesti suppeampaa. (Aaltonen et al. 2008; Leppävirta et al. 2017)

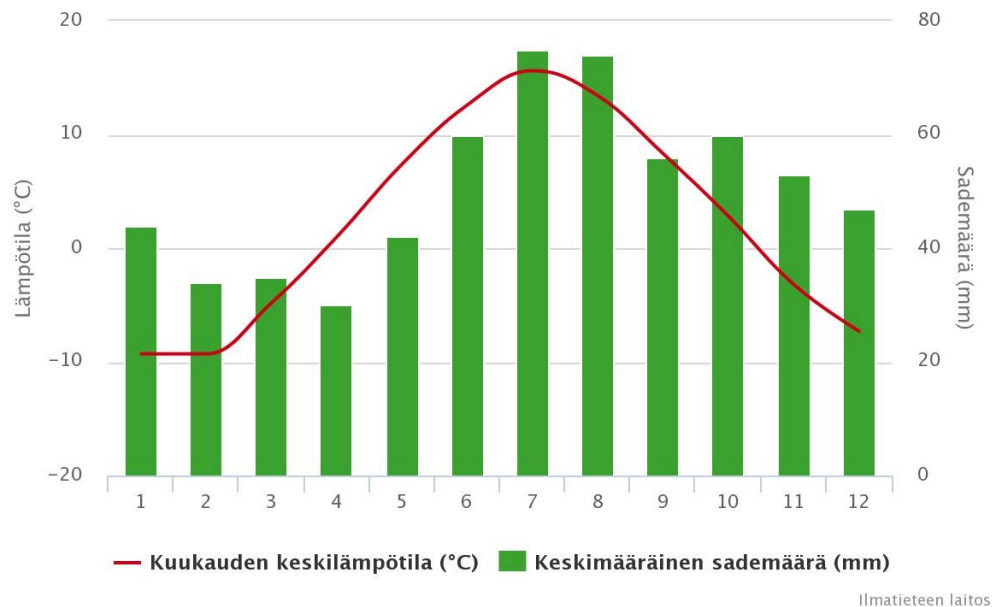
Konvektiivinen kuuro sade syntyy, kun aurinko lämmittää maanpintaa ja sen lähellä oleva ilma alkaa lämmitessään kohoamaan nopeasti ylöspäin (konvektio). Suomessa konvektiiviset sateet liittyvät usein ukkosiin. Konvektiiviset sateet ovat suhteellisen rankkoja, lyhytkestoisia ja paikallisia. Sateen määrä saattaa kuitenkin olla suuri. Orografinen (pakotetun nousuliikkeen aiheuttama) sade syntyy, kun liikkuva ilmassa kohtaa esteen, esimerkiksi vuoriston, minkä seurauksena ilma joutuu nousemaan ylöspäin. Suomessa korkeuserot ovat pieniä, mutta pienimuotoistenkin korkeuserojen on todettu vaikuttavat sateen alueelliseen jakaumaan. (Aaltonen et al. 2008; Leppävirta et al. 2017)

Suomen vuotuinen sademäärä on noin 500 – 650 mm. Sateen määrä vaihtelee eri alueiden välillä runsaasti (kuva 2). Lapissa sataa vähiten ja etelä- ja keskiosissa Suomea eniten. Erot sademäärissä johtuvat pääasiassa ilmakehän keskimääräisen kosteuden vähenemisestä pohjoiseen mentäessä, maaston korkeuseroista sekä meren läheisyydestä (Suomen Kuntaliitto 2012).



**Kuva 2.** Vuoden keskilämpötila [°C] (vasen kartta) ja keskimääräinen vuotuinen sademäärä [mm] (oikea kartta) vuosina 1981-2010 (Ilmatieteenlaitos a)

Vähiten Suomessa sataa keväisin ja kesää kohden sademäärät kasvavat. Vuosina 1981-2010 satoi keskimäärin eniten kesä- ja heinäkuussa ja vähiten huhtikuussa (kuva 3). Suomessa rankimmat sateet ajoittuvat kesään, jolloin ilma on lämmintä ja kosteaa. Rankkasateiden todennäköisyys Pohjois-Suomessa on pienempi kuin Etelä-Suomessa. (Aaltonen et al. 2008; Ilmatieteenlaitos a)



**Kuva 3.** Suomen keskimääräinen ilman lämpötila ja sademäärä kuukausittain vuosina 1981-2010 (Ilmatieteen laitos b)

## 2.2 Rakentamisen vaikutukset veden kiertokulkuun

Rakentaminen vaikuttaa alueen hydrologiseen kiertoon merkittävästi. Rakentaminen lisää vettä läpäisemättömiä ja päällystettyjä pintoja ja toisaalta vähentää luonnonmukaista ympäristöä (Suomen kuntaliitto 2012). Vettä läpäisemättömiä pintoja ovat esimerkiksi asfalttipäällysteet ja pohjaveden luiskasuojausten tiivistyskerrokset.

Päällystetyillä pinnoilla haihdunta on yleensä käytännössä olematonta. Kasvillisuuden puuttuessa interseptio ja transpiraatio jäävät tapahtumatta. Päällystetty pinta johtaa vettä nopeasti pois, jolloin haihduntaa ei ehdi tapahtua juuri lainkaan. Hetkellisesti evaporaatio voi lämpimänä ja tuulisena päivänä kesäsateen jälkeen olla päällystetyillä pinnoilla 5-10 mm, mutta vuosittaisella tasolla haihdunta jää käytännössä nolnaan. (Suomen kuntaliitto 2012)

Päällystetyt ja vettä läpäisemättömät pinnat vähentävät tai estävät veden imeytymistä maaperään ja pohjaveteen, mikä voi johtaa pohjaveden pinnan alenemiseen. Haihdunnan ja maaperään imeytymisen väheneminen johtavat pintavalunnan lisääntymiseen.

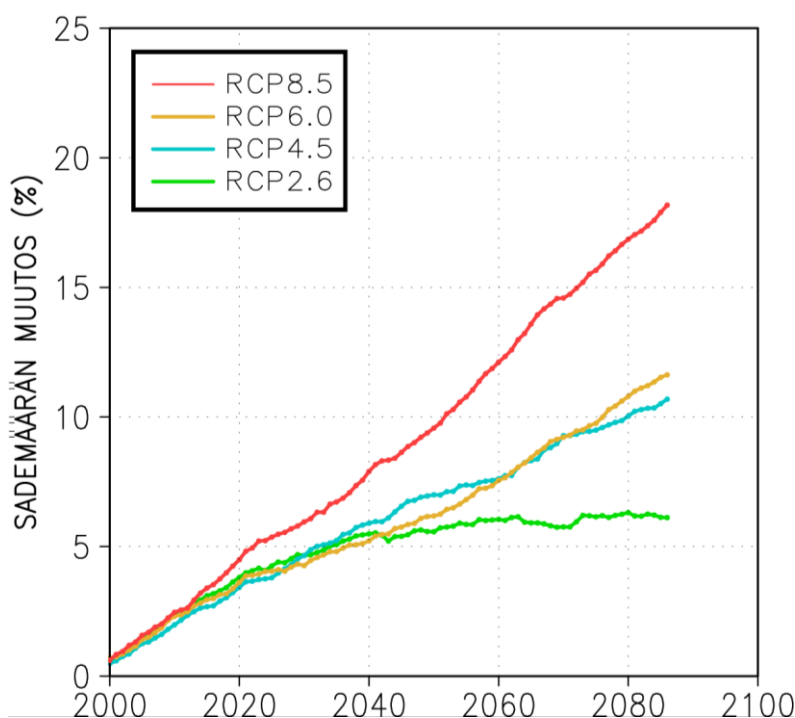
Päälystetyiltä pinnoilta syntyy suurempia määriä pintavaluntaa sekä korkeampia ja nopeampia virtaamia, kuin luonnonmukaisilta alueilta (Minnesota Stormwater Steering Committee 2005). Pintavaluntaa eli rakennetun ympäristön sade- ja sulamisvesiä kutsutaan hulevesiksi. Mitä suurempi päälystetyn alueen pinta-ala on, sitä enemmän ja nopeammin syntyy hulevesiä. Rakentaminen voi muuttaa myös luonnollista uomaverkostoa, mikä vaikuttaa veden virtaukseen. (Vakkilainen et al. 2005)

Erityisesti taajamissa, jossa ympäristö on voimakkaasti muutettua, kaikki hydrologisen kierron osa-alueet poikkeavat luonnonmukaisesta. Kaupunkialueilla sadanta voi lisääntyä 5 – 10 %, verrattuna taajaman ulkopuoliseen ympäristöön. Syitä tähän ovat muun muassa kaupungeissa esiintyvät ilmansaastepitoisuudet ja voimistunut konvektio. Lisäksi pintavalunta lisääntyy ja haihdunta pienenee, kun päälystetyn alueen osuus kasvaa. (Suomen kuntaliitto 2012)

### **2.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset veden kiertokulkuun**

Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta Suomen sademäärien on ennustettu kasvavan kuluvalle vuosisadalla. Sademäärien kasvu riippuu siitä, miten kasvihuonekaasupäästöt kehittyvät tulevaisuudessa. (Ruostenoja et al. 2016) Päästöjen suuruuden mukaan on kehitetty kasvihuonekaasuskenaarioita (RCP representative concentration pathways). Skenaariossa RCP8.5 päästöt jatkavat nousuaan koko vuosisadan ja ovat vuonna 2100 lähes kolminkertaiset verrattuna vuoden 2000 päästöihin. Muissa skenaarioissa (RCP6.0, RCP4.5 ja RCP2.6) päästöt alkavat laskea vuosisadan aikana. Skenaariossa RCP6.0 päästöt kasvavat vuoteen 2080 asti. Skenaarioissa RCP4.5 ja RCP2.6 päästöt alkavat laskea nopeammin ja vuoteen 2100 ollaan saavutettu jo pienemmät päästöt kuin vuonna 2000. (Moss et al. 2010)

Vuosisadan loppupuoleen mennessä vuotuisten sademäärien ennustetaan kasvavan jokaisella päästöskenaariolla verrattuna vuosien 1981-2010 keskiarvoon (kuva 4). Skenaariossa RCP8.5 vuotuinen sademäärä kasvaisi lähes 20 % vuoteen 2085 mennessä. Melko suuret (RCP6.0) ja melko pienet (RCP4.5) päästöt aiheuttaisivat noin 11-12 prosentin kasvun sademääriin ja hyvin pienetkin päästöt (RCP2.6) lisäisivät sademäärää noin 6 %. (Ruostenoja et al. 2016)



**Kuva 4.** Sademäärän keskiarvon kasvu eri päästöskenaarioissa vuoteen 2085 mennessä. (Ruosteenoja et al. 2016)

Sademäärä riippuu sateiden toistuvuudesta ja sateiden rankkuudesta eli intensiteetistä. Ilmastomuutos vaikuttaa sadepäivien määrään ja rankkasateiden voimakkuuteen eri vuodenaikoina eri tavalla ja lisäksi skenaarioissa muutokset ovat erilaisia Pohjois-Suomessa kuin Etelä-Suomessa (taulukko 1). Sademäärä kasvaa jokaisena vuodenaikana Suomessa, mutta suhteellisesti eniten sademäärä kasvaa talvella lisääntyneiden sadepäivien ja sateen intensiteetin kasvun seurauksena. Sateen olomuoto vaihtuu yhä useammin lumesta vesisateeksi. Kokonaissademäärä on jatkossakin kesällä suurempi kuin talvella. Kesällä ilmastomuutos vaikuttaa erityisesti rankkasateiden lisääntymiseen, ei niinkään sadepäivien määrään. Myös tulevaisuudessa rankkimmat sateet ovat kesällä ja alkusyksystä. Maantieteellisesti sademäärät kasvavat eniten Pohjois-Suomessa, etenkin talvella. (Ilmatieteenlaitos 2017a)

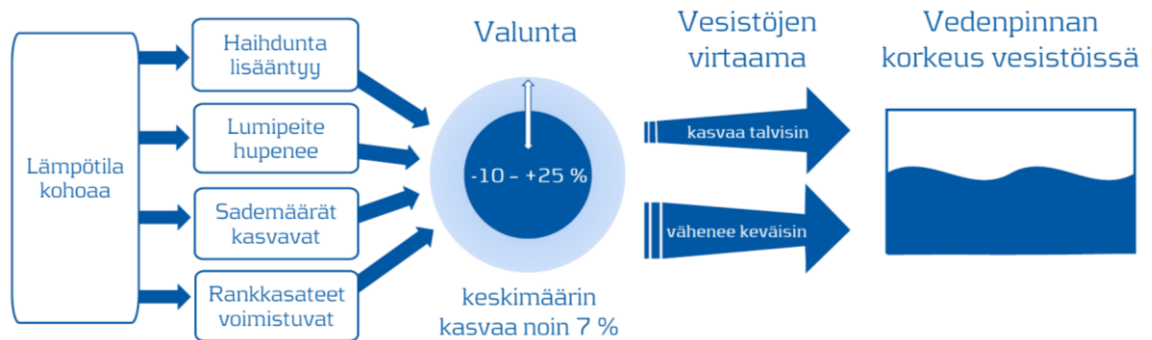
**Taulukko 1.** Ilmastomuutoksen vaikutukset keskimääräiseen sademäärään, sadepäivien määrään ja rankkasateiden voimakkuuteen Pohjois- ja Etelä-Suomessa eri vuodenaikoina. (Ilmatieteenlaitos 2017a)

Muuttuja	Alue	Talvi	Kevät	Kesä	Syksy	Vuosi
<b>Keskimääräinen sademäärä</b>	Pohjois-Suomi	kasvaa huomattavasti	kasvaa	kasvaa	kasvaa	kasvaa
	Etelä-Suomi	kasvaa	kasvaa	ennallaan	kasvaa	kasvaa
<b>Sadepäivien määrä</b>	Pohjois-Suomi	lisääntyy	ennallaan	ennallaan	lisääntyy	lisääntyy
	Etelä-Suomi	lisääntyy	ennallaan	ennallaan	ennallaan	lisääntyy
<b>Rankkasateiden voimakkuus</b>	Pohjois-Suomi	lisääntyy	lisääntyy	lisääntyy	lisääntyy	lisääntyy
	Etelä-Suomi	lisääntyy	lisääntyy	lisääntyy	lisääntyy	lisääntyy

Ilmastomuutoksen on ennustettu vaikuttavan merkittävästi myös muihin hydrologisiin vuosuureisiin kuin sadantaan. Lämpötilan nouseminen ja kevään aikaistuminen lisäävät haihduntaa. Potentiaalinen haihdunta kasvaa vuosina 2040-2069 noin 10-20 % verrattuna vuosien 1971-2000 haihduntaan. Lumen määrän muutos on myös yksi merkittävimmistä ilmastomuutoksen seurauksista. Lumen määrä vähenee koko maassa, suhteellisesti eniten Etelä-Suomessa. (Veijalainen et al. 2012)



Valunta ei kasva samassa suhteessa kuin sademäärät, sillä siihen vaikuttavat myös haihdunta ja lumipeitteen muutokset (kuva 5). Valunta kasvaa keskimäärin 1-3 % vuosina 2010-2039 ja jaksolla 2010-2069 noin 6-8% verrattuna vuosiin 1971-2000. Suhteellisesti eniten valunta kasvaa talvella, kun taas keväällä valunta todennäköisesti pienenee, sillä lumen sulamisen aiheuttama kevätvaluma vähenee. Valunnan muutokset vaikuttavat vesistöjen virtaamiin ja vesistöjen vedenpinnan korkeuksiin. (Veijalainen et al. 2012)



**Kuva 5.** Ilmastonmuutoksen vaikutukset vuoteen 2050 mennessä valuntaan, vesistöjen virtaamiin ja vedenpinnan korkeuksiin (Ilmatieteen laitos 2016)

Ilmastonmuutoksen ennustetaan lisäävän tulvia. Sademäärien ja rankkojen sateiden lisääntyminen lisäävät hulevesitulvien riskiä. Valunnan muutoksen seurauksena vesistötulvien ennakoidaan kasvavan Vuoksen, Kokemäenjoen ja Kemijoen vesistöissä. Toisaalta keväällä lumien sulamisesta aiheutuvien tulvien ennakoidaan pienenevät (Veijalainen et al. 2012).

### 3. KUIVATUSSUUNNITTELU JA KUIVATUSRAKENTEIDEN MITOITTAMINEN

Väylän kuivatussuunnittelulla pyritään hallitsemaan väylän alueella syntyneet hulevedet sekä väylän ulkopuolelta kulkeutuneet vedet siten, että niistä ei ole haittaa liikenneturvallisuudelle, väylän rakenteille, omaisuudelle eikä ympäristölle. Kuivatussuunnittelu koostuu varsinaisesta väylän kuivatuksesta sekä hulevesien hallinnasta. Kuivatussuunnitteluun kuuluu kuivatusrakenteiden mitoittaminen.

Kappaleessa perehdytään väylien kuivatussuunnitteluun sekä kuivatus- ja hulevesien hallintarakenteiden mitoitusperusteisiin. Mitoitusperusteiden teoreettinen tausta käsitellään yleisellä tasolla, sekä tutustutaan Väyläviraston ohjeistuksen mukaisiin mitoitusmenetelmiin. Perinteisten mitoituskäytäntöjen lisäksi kuivatussuunnittelussa olisi mahdollista hyödyntää mallintamista. Hulevesien mallintamista esitellään lyhyesti ja sen jälkeen perehdytään mallinnusta koskevaan tutkimukseen Pohjoismaissa.

#### 3.1 Väylän kuivatus ja kuivatusjärjestelmät

Kuivatussuunnittelussa tärkein lähtökohta on väylän kuivatus. Kuivatuksen tarkoituksena on johtaa vesi pois väylien pinnoilta ja rakenteista. Kuivatus voidaan jakaa pinta- ja syväkuivatukseen. Pintakuivatuksen tavoitteena on estää veden kertyminen väylän pinnalle ja vierialueille. Nopea huleveden johtaminen pois ajoradan pinnalta on tärkeää liikenneturvallisuuden kannalta, sillä mitä paksumpi kerros vettä tien pinnalla on, sen suurempi riski on vesiliirtoon (Brown et al. 2013). Pintakuivatuksella estetään myös veden haitallinen kulkeutuminen väylän rakenteen läpi ja päällysteen reikiintyminen. Syväkuivatuksella tarkoitetaan päällysrakenteen ja alusrakenteen kuivatusta kantavuuden säilyttämiseksi ja routimisen vähentämiseksi. (Liikennevirasto 2013a)

Väyläviraston hankkeissa kuivatus suunnitellaan Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu -ohjeen mukaisesti. Väylän pintakuivatus toteutetaan johtamalla hulevedet kaltevuusjärjestelyin pois ajoradalta kuivatusjärjestelmiin. Kaltevuusjärjestelyt tarkoittavat tien sivukaltevuutta ja pituuskaltevuutta. Pintakuivatukseen kuuluvat myös sivu-, niska- ja laskuojat sekä hulevesiviemärointi ja koururakenteet. Väylärakenteen syväkuivatus voidaan toteuttaa esimerkiksi salaojien tai syvien avo-ojien avulla. (Liikennevirasto 2013a)

Väylän pintavalunta johdetaan yleensä kaltevuusjärjestelyin sivuojiin tai keski- ja välialueiden ojiin tai painanteisiin. Keski- ja välialueilta hulevedet johdetaan rumpuja tai hulevesiviemäreitä pitkin sivuojiin. Sivuojat kokoavat tiealueen pintavedet ja johtavat ne laskuojaan tai muuhun purkupisteeseen. Sivuojissa tulee olla riittävä vietto (0,4 %), jotta vesi virtaa, eikä oja liety tai kasva umpeen. Teiden liittymien kohdalla sivuojan vedet johdetaan liittymärummulla liittyvän tien ali. (Liikennevirasto 2013a)

Mikäli sivuojia ei ole mahdollista toteuttaa, esimerkiksi tilan puutteen vuoksi, reunakivellisissä poikkileikkauksissa tai alikuluissa voidaan hulevedet kerätä hulevesikaivojen kautta hulevesiviemäriin. Mikäli hulevesiviemäriin vesiä ei saada maasto-olosuhteiden vuoksi viettoviemäroinnillä johdettua purkupisteeseen, tarvitaan hulevesipumppaamo. (Liikennevirasto 2013a)

Väyliä hulevedet johdetaan purkuvesistöihin laskuojilla. Laskuojat voivat olla olemassa olevia ojia, jotka keräävät vettä esimerkiksi pelloilta tai metsistä tai uusia väylähankkeen yhteydessä suunniteltavia ojia. Mikäli väylä suunnitellaan siten, että se risteää laskuojan tai muun vesiuoman kanssa, tulee oja johtaa väylän alitse rummulla. Rummut tulisi sijoittaa vanhan laskuojan lähelle mahdollisimman kohtisuoraan väylään nähden. Rummun halkaisijan ollessa yli 2 metriä kyseessä on silta. Niskaojia ja koururakenteita käytetään leikkausluiskan yläpuolissa rinteissä kokoamaan leikkauksessa olevan väylän valuma-alueen vesiä, luiskien syöpmisen ehkäisemiseksi. (Liikennevirasto 2013a)

### **3.2 Hulevesien hallinnan periaatteet**

Väylän kuivatuksesta syntyneet hulevedet tulee hallita asianmukaisesti, jotta ne eivät aiheuta haittoja paikan päällä tai vastaanottavassa ympäristössä. Maankäytön muuttamisen ja ilmastomuutoksen seurauksena hulevedet voivat aiheuttaa hallitsemattomana sekä määrällisiä, että laadullisia haittoja. (Kuntaliitto 2012)

Hulevedet voivat aiheuttaa tulvimista kuivatusjärjestelmän kapasiteetin ylittyessä. (Saarelainen et al. 2007). Tulviminen voi johtua esimerkiksi rankkasateen aiheuttamasta korkeasta hetkellisestä huippuvirtaamasta tai sadejakson aiheuttamasta suuresta hulevesimäärästä (Aaltonen et al. 2008). Hulevedet voivat aiheuttaa tulvimista lähellä syntypaikkaa ja purkuvesistöissä tai -järjestelmissä. Suuret huippuvirtaamat ja iso virtausnopeus voivat aiheuttaa veden virtauskanavissa eroosiota ja haittaa eliöstölle. Eroosio voi syventää uomia sekä kuluttaa ja sortaa niiden penkereitä. Toisaalta veden nopea purkautuminen voi johtaa myös pienentyneisiin alivirtaamiin eli uoman vesimäärien vähenemiseen, mikä voi olla myös haitallista eliöstölle. Veden imeytymisen vähenemisestä johtuva

pohjaveden pinnan lasku voi aiheuttaa esimerkiksi tie- ja ratapenkereiden tai rakennusten painumista sekä kaivojen ja vedenottamoiden kuivumista (Liikennevirasto 2013a). (Minnesota Stormwater Steering Committee 2005)

Rakennetuilta alueilta muodostunut hulevesi voi sisältää haitta-aineita, jotka voivat vaikuttaa haitallisesti vastaanottavaan vesistöön ja pohjavesiin. Liikenne- ja tiealueilla haitta-ainepäästöjä aiheutuu muun muassa renkaiden ja jarrujen kulumisesta, pakokaasuista, liukkaidentorjunta-aineista, tienpinnan kulumisesta sekä liikenneonnettomuuksista. Suurin osa haitta-aineista on sitoutuneena kiintoaineeseen ja saadaan pidättymään ojaluisien pintaverhoiluun. Pohjavesiä vaarantavia aineita ovat erityisesti tiesuola ja bensiinin lisäaine MTBE, sillä ne ovat hyvin vesiliukoisia ja voivat kulkeutua pohjavesiin. Pohjavesiä voidaan suojata estämällä veden imeytyminen maaperään pohjavesialueella. (Kuntaliitto 2012; Liikennevirasto 2013a)

Hulevesien aiheuttamia haittoja voidaan ehkäistä säilyttämällä veden kiertokulku rakentamisesta huolimatta mahdollisimman luonnollisena. Yleiset periaatteet, joiden avulla pyritään ehkäisemään hulevesistä aiheutuvia haittoja ovat tärkeysjärjestyksessä seuraavat:

1. hulevesien muodostumisen estäminen,
2. hulevesien määrän vähentäminen,
3. hulevesien johtaminen pois viivyttävällä ja suodattavalla järjestelmällä,
4. hulevesien johtaminen yleisillä alueilla sijaitseviin viivytysjärjestelmiin, esimerkiksi kosteikkoihin,
5. hulevesien johtaminen suoraan purkuvesiin tai pois alueelta. (Kuntaliitto 2012)

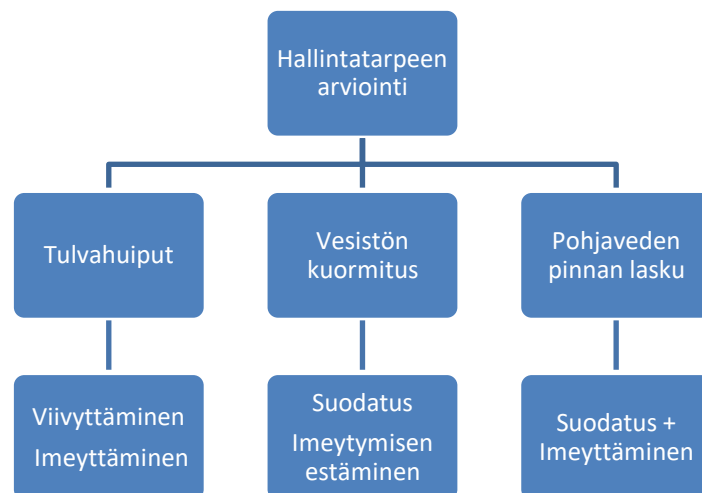
Hulevesien määrää voidaan vähentää rajoittamalla rakennettujen pintojen määrää, imeyttämällä hulevettä maaperään ja haihduttamalla sitä kasvillisuuden avulla (Kuntaliitto 2012). Maanteiden asfalttipinnalta hulevesi halutaan kuivatuksen takia johtaa mahdollisimman tehokkaasti pois, joten hulevesien määrää ei ole tällöin mahdollista vähentää suoraan syntypaikalla (Liikennevirasto 2013a). Huleveden määrää on mahdollista vähentää käyttämällä läpäiseviä päällysteitä vähäliikenteisillä alueilla, joilla ei ole suurta kuormitusta raskaasta liikenteestä, eivätkä ajonopeudet ole suuria. Käyttökohteita voivat olla esimerkiksi kevyen liikenteen väylät ja parkkipaikat. (Kuosa et al. 2005)

Väylähankkeissa hulevedet johdetaan useimmiten pois avoimilla järjestelmillä, mitkä jo itsessään voivat imeyttää, viivyttää ja suodattaa hulevesiä. Viivyttämällä ja imeyttämällä tasataan virtaamahuippuja ja vähennetään huleveden kokonaismäärä. Suodatta-

misella pyritään parantamaan huleveden laatua. Maanteillä voidaan käyttää kaksikerroksista ojaa, jossa vesi suodattuu ensin kasvillisuuden tai suodatuskerroksen avulla, ja sitten virtaa salaojaa pitkin purkuvesistöön. Hulevedet voidaan johtaa myös erillisiin viivytys-, suodatus- ja imeytysjärjestelmiin, joita ovat esimerkiksi biosuodatusalueet, viivytys- ja laskeutusaltaat sekä kivipesät. Viimeinen vaihtoehto on huleveden poisjohtaminen putkijärjestelmässä. Se ei mahdollista huleveden vähenemistä eikä viipymistä, vaan johtaa huleveden nopeasti ja käsittelemättömänä purkupisteeseen. (Kuntaliitto 2012; Liikennevirasto 2013a)

### 3.3 Hulevesien hallintatarpeen arviointi väyläsuunnittelussa

Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu -ohjeen mukaan väyläsuunnittelussa on arvioitava hulevesien aiheuttamia riskejä (tulvahuiput, vesistön kuormitus ja pohjaveden pinnan lasku) ja tarvetta niitä ehkäiseville toimenpiteille (kuva 6). (Liikennevirasto 2013a)



**Kuva 6.** Väyläviraston ohjeistuksen mukainen hulevesien hallintatarpeen arviointi: riskit ja niitä ehkäisevät toimenpiteet (Liikennevirasto 2013a)

Tulvahuippujen rajoittamistarve viivyttämällä ja suodattamalla on selvitettävä vähintään silloin kun vettä läpäisemätön pinta-ala lisääntyy tai laskuojan tai lammen purku-uoman virtaama kasvaisi huomattavasti, hulevedet on tarkoitus johtaa olemassa olevaan hulevesiviemäriin, purkuvesistö on ennestään tulvimis- ja eroosio herkkä tai alueella on jo esiintynyt tulvimisongelmia. (Liikennevirasto 2013a)

Vesistön kuormituksen ehkäisyksi suodatusta tarvitaan aina, kun tien liikennemäärät ja siten myös haitta-aine määrät ovat suuret (15 000 ajoneuvoa/vrk) ja samanaikaisesti

purkuvesistö on herkkä ympäristöolosuhteiden muutokselle. Mikäli pohjaveden pinnan lasku aiheuttaa riskejä, hulevettä voi olla tarpeen imeyttää maaperään. Mikäli hulevettä on tarpeen imeyttää pohjavesialueella, täytyy se ensin suodattaa (Sikiö 2019).

Pintavesien lisäksi myös pohjavesien kuormitusta tulee arvioida. Maanteiden pohjaveden suojelutoimenpiteiden suunnittelussa noudatetaan ohjetta ”Pohjaveden suojele maantiellä” (Väylävirasto 2019a). Pohjaveden suojelutarpeen arviointi maantiehankkeissa perustuu riskinarviointiin, jossa otetaan huomioon tien aiheuttama riski, pohjavesialueen merkitys ja pohjavesialueen herkkyys. Pohjaveden riskienhallinta- ja suojelutoimenpiteitä maanteilla ovat esimerkiksi vaihtoehtoisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttö, pohjavedelle haitallisten aineiden kuljetusten rajoittaminen tai pohjaveden suojauksen rakentaminen. Pohjaveden suojauksen toteuttaminen vähentää pohjaveden muodostumista alueella. (Sikiö 2019)

### **3.4 Kuivatussuunnittelu väylähankkeiden eri vaiheissa**

Tie- ja ratahankkeiden suunnittelu on prosessi, joka tarkentuu vaiheittain. Vaiheet ovat esiselvitys, yleissuunnitelma, tie- tai ratasuunnitelma ja rakennussuunnitelma. Esiselvitysvaiheessa tutkitaan tie- ja ratahankkeiden tarvetta ja ajankohtaa ja väylän likimääräisestä sijainnista voi olla eri vaihtoehtoja. Esiselvitys vaiheessa selvitetään ympäristön asettamat reunaehdot suunnittelulle. (Tiehallinto 2009a; Väylävirasto 2019b) Suunnittelussa otetaan huomioon esimerkiksi maakunta- ja yleiskaavoissa esitetyt hulevesien hallintaa koskevat määräykset. Kaavoissa on voitu osoittaa tilavarauksia hulevesien käsittelyyn. Kaavojen laadinnan yhteydessä on voitu myös laatia valuma-alue tarkasteluja ja huleveden hallinnan selvityksiä. (Kuntaliitto 2012)

Yleissuunnitteluvaiheessa määritellään väylän likimääräinen paikka ja tilan tarve sekä suhde ympäröivään maankäyttöön. Mikäli hankkeesta tulee tehdä lain (252/2017) mukainen ympäristövaikutusten arviointi (YVA), tehdään se yleissuunnitelman yhteydessä. YVA-prosessissa laaditaan tarvittavat ympäristövaikutusten selvitykset. (Tiehallinto 2009a) Pohjavesien suojelun kannalta merkittävimmät päätökset tehdään yleissuunnitelmavaiheessa (Sikiö 2019).

Tie- ja ratasuunnitelmavaiheessa suunnitellaan väylä yksityiskohtaisesti, siten että sen tarkka tilantarve selviää. Tie- ja ratasuunnitelma ovat lakisääteisiä suunnitelmia, joista tehdään hyväksymispäätös. Tiesuunnitelma perustuu liikennejärjestelmästä ja maanteistä annettuun lakiin ja ratasuunnitelma perustuu ratalakiin. Hyväksytty tie- tai ratasuunnitelma antaa tien tai radan pitäjälle oikeuden lunastaa tarvittavat alueet tien tai radan toteuttamiseksi. Tie- ja ratasuunnitelmassa esitetään kuivatuksen yleissuunnitelma

ja laskuoja-alueeksi tarvittavat alueet sekä merkittävät rummut, kaikki laskuojat, sadevesipumppaamot ja viemärit. Mahdollisten hulevesien hallintarakenteiden tilantarve tulee myös huomioida. Lisäksi esitetään haittojen torjumis- ja lieventämistoimenpiteet kuten pohjaveden suojaus. (Tiehallinto 2009b)

Rakennussuunnitelman perusteella hanke toteutetaan. Rakennussuunnitelmassa kuivatus- ja huleveden hallintajärjestelmät esitetään yksityiskohtaisella tasolla. Rakennussuunnitelmaan kuuluvia asiakirjoja ovat kuivatuskartta, laskuojien ja hulevesiviemäreiden pituusleikkaukset, rumpuluettelo, kaivokortit, pohjaveden suojaus (rakenteet ja materiaalit) ja altaiden ja pumppaamoiden piirustukset. Hulevesipumppaamon ja altaiden piirustuksissa tulee esittää myös mitoitusperusteet. (Liikennevirasto 2013b)

### **3.5 Kuivatus- ja hulevesijärjestelmien mitoituskäytännöt**

Kuivatus- ja hulevesien johtamis-, viivytys-, imeytys- ja suodatusjärjestelmät mitoitetaan yleensä hydraulisesti eli mitoitusvirtaamaan tai mitoituslavuuteen perustuen. Mitoitusvirtaama on suurin tietyllä todennäköisyydellä tapahtuva virtaama eli huippuvirtaama. Mitoittavana tapahtumana voi olla lumen sulaminen tai rankkasade. (Kuntaliitto 2012)

Kuivatus- ja hulevesien johtamisjärjestelmien mitoitukseen käytetään huippuvirtaamaa. Huippuvirtaaman laskentaan käytetään rakennetuilla alueilla yleensä mitoitusadetta eli yksittäistä sadetapahtumaa, jolle on määritetty intensiteetti, kesto ja tilastollinen toistumisväli. Suurilla rakentamattomilla alueilla lumen sulaminen voi aiheuttaa suuremman huippuvirtaama kuin rankkasade, jolloin kevytylivalumaa käytetään mitoitus tapahtumana. Sadannan aiheuttaman huippuvirtaaman laskentaan on monia menetelmiä. Suomessa hule- ja kuivatusvesiin liittyvässä ohjeistuksessa eli Väyläviraston ohjeistuksessa (Liikennevirasto 2013a), Kuntaliiton Hulevesioppaassa (Kuntaliitto 2012) ja Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (RIL) käsikirjassa Vesihuolto II (Karttunen 2004) käytetään rationaalista menetelmää (luku 3.5.4). Mitoitusvirtaamaa voidaan selvittää myös esimerkiksi yksikkövaluntakäyrillä tai mallintamalla tietokoneavusteisesti. (Karttunen 2004; Kuntaliitto 2012)

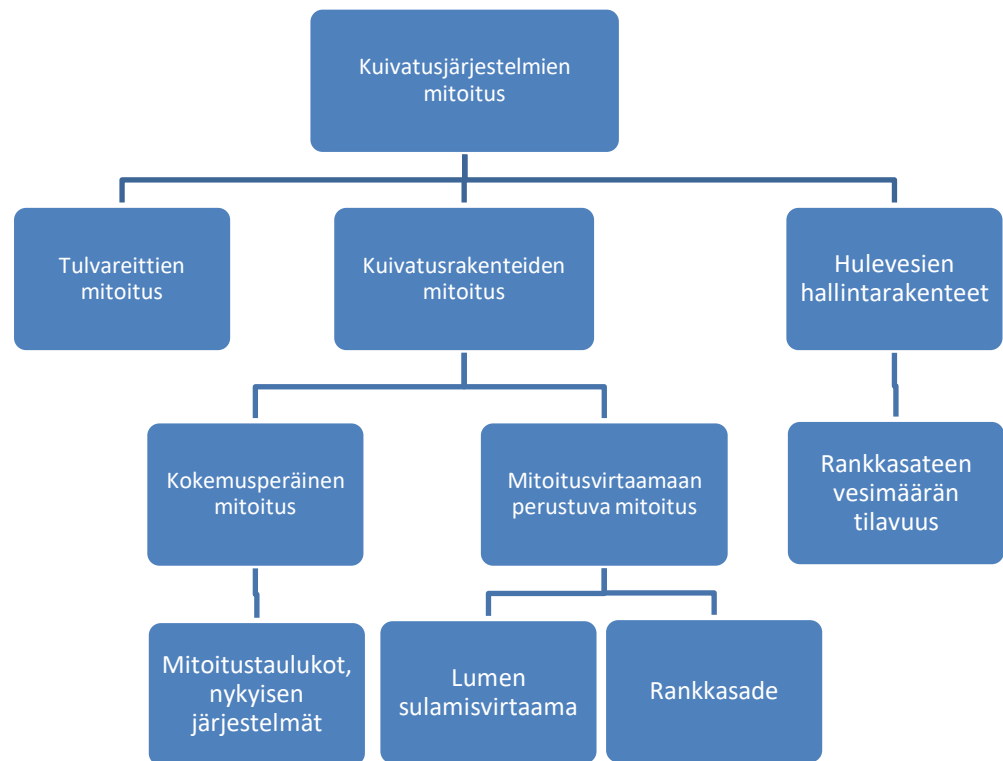
Kun mitoitusvirtaama on selvitetty, voidaan johtamisjärjestelmät mitoittaa joko hydraulisten laskentakaavojen ja nomogrammien perusteella tai mallintamalla. Esimerkiksi hulevesiviemärien mitoitukseen käytetään Colebrookin nomogrammia, jossa putken halkaisija saadaan mitoitusvirtaaman ja kaltevuuden perusteella. Kun mitoitus tehdään mallintamalla, putken halkaisija määritetään iteroimalla. Tavoitteena on löytää sellainen putken halkaisija, jolla mitoitusvirtaama ei aiheuta padotusta. Lähtökohtana voidaan käyttää

esimerkiksi nomogrammien perusteella saatua putkikokoa ja mallinnuksella voidaan tarkastella johtamisjärjestelmän toimivuutta vaihtelemalla eri putkikokoja ja putken kaltevuuksia. (Karttunen 2004; Kuntaliitto 2012)

Viivytys-, imeytys- ja suodatusjärjestelmien mitoitus voi perustua hulevesien määrään eli tilavuuteen tai mitoitusvirtaamaan. Hulevesien tilavuutta voidaan arvioida esimerkiksi Hulevesioppaassa (Kuntaliitto 2012) esitetyillä rationaalisesta menetelmästä johdetulla laskentakaavalla tai sademäärään perustuvalla kaavalla. Mitoitustapahtuma valitaan järjestelmän käyttötarkoituksen perusteella. Esimerkiksi hulevesien laadun hallintaan ja imeyttämiseen tarkoitetut järjestelmät mitoitetaan siten, että niiden avulla pystytään käsittelemään tavanomaisten sateiden hulevesimäärä eli mitoitusasteeksi valitaan usein toistuva sade. Hulevesioppaassa on esitetty mitoituskaavoja esimerkiksi imeytyskaivannoille ja maanpäällisille viivytysrakenteille. (Kuntaliitto 2012)

Väylän kuivatuksesta syntyvät hulevesimäärät eivät yleensä ole kovin suuria, joten kuivatusjärjestelmien mitoitus voi perustua hydraulisen mitoituksen sijasta myös muihin tekijöihin. Esimerkiksi tien sivuojien suunnittelussa myös työtekniikka, kunnossapidettävyyys, ulkonäkö sekä liikenneturvallisuus voivat määrittää sivuojan muodon ja mitoituksen. Väyläviraston ohjeistuksen mukainen kuivatusjärjestelmien mitoitus voidaan jakaa kuivatusrakenteiden ja tulvareittien sekä hulevesien hallintarakenteiden mitoitukseen (kuva 7). (Liikennevirasto 2013a)





**Kuva 7.** Väyläviraston ohjeistuksen mukaiset mitoituskäytännöt kuivatusrakenteille, tulvareiteille sekä hulevesien hallintarakenteille (Liikennevirasto 2013a)

Tulvareittejä suunnitellaan suurimpien vesimäärien hallittua purkupaikalle johtamista varten esimerkiksi alueellisten kuivatussuunnitelmien laatimisen yhteydessä. Tulvareittien suunnittelussa otetaan huomioon tiestön merkittävyys, mahdolliset sortumariskit ja kiertomahdollisuudet tulvatilanteessa. Tulvareitit mitoitetaan esimerkiksi kerran 100 tai 200 vuodessa toistuville sadetapahtumille. (Liikennevirasto 2013a)

Väylien kuivatusrakenteet mitoitetaan joko kokemusperäisesti tai mitoitusvirtaamaan perustuen. Mitoitusmenetelmä valitaan tapauskohtaisesti suunniteltavan kuivatusrakenteen mukaan. Taulukossa 2 on esitelty rakenteittain, käytetäänkö suunnittelussa kokemusperäistä vai mitoitusvirtaamaan perustuvaa mitoitusta. X:llä on merkitty tavanomaisin mitoitustapa. Kokemusperäisessä mitoituksessa arvioidaan nykyisten kuivatusjärjestelmien riittävyyttä esimerkiksi esiintyneiden tulvahavaintojen perusteella. Kokemusperäisessä mitoituksessa tulee ilmaston muutoksen takia tarkastella kuitenkin järjestelmiä myös 20 % kasvaneella virtaamalla. (Liikennevirasto 2013a)

**Taulukko 2.** Väyläviraston ohjeistuksen mukainen kuivatusrakenteiden mitoitus (Liikennevirasto 2013a)

Kuivatusrakenne	Kokemusperäinen mitoitus	Mitoitusvirtaamaan perustuva mitoitus
Sadevesiviemäri	Valuma-alue < 0,5 ha	X
Pumppaamo	-	X
Sivu- ja laskuojat	Valuma-alue < 5 ha	Laskuojan valuma-alue > 20 ha
Kourut ja niskaojat	X	
Keski- ja välialueojat	X	
Rummut	Valuma-alue < 5 ha	Uoman vieressä asutusta/ ylivirtaaman toistuvuus aika > 20 vuotta/ valuma-alue > 20 ha/ rumpu taajamassa.

Ennen mitoistustavan valintaa, valuma-alueen pinta-ala tulee selvittää. Valuma-alueen määrittäksessä otetaan huomioon suunniteltavan väylän linjaus, rumpujen sijainti ja ta-sauksen vaikutus sivuojiin sekä nykyinen sadevesiviemäriverkosto. Hyvin suurten (yli 100 km<sup>2</sup>) ja suurten (1 – 100 km<sup>2</sup>) valuma-alueiden tiedot pyydetään suunnittelua varten yleensä alueelliselta ympäristöviranomaiselta tai alueen pinta-ala määritetään peruskar-tan (1:25 000) avulla. Pienten (1 – 100 ha) ja hyvin pienten (alle 1 ha) valuma-alueiden koko määritetään joko karttatarkastelulla tai laserkeilausaineiston avulla. Tietoja täyden-netään tarvittaessa maastokatselmuksella. (Liikennevirasto 2013a)

Väyläviraston ohjeistuksen mukaan mitoitusvirtaama voidaan laskea joko rankkasateen tai lumen sulamisvirtaaman perusteella, riippuen valuma-alueen koosta (taulukko 3). Jos vaihtoehtona on kumpikin, käytetään aina suuremman mitoitusvirtaaman antavaa las-kentatapaa.

**Taulukko 3.** Väyläviraston ohjeistuksen mukainen laskentatavan valinta valuma-alueen pinta-alan mukaan (Liikennevirasto 2013a)

Valuma-alueen pinta-ala [ha]	Mitoitusvirtaaman laskentavan määräytyminen
< 10	rankkasade
10...100	rankkasade tai lumen sulaminen ..... rakennetuilla ja viemäröidyillä alueilla usein rankkasade
> 100	lumen sulaminen ----- rakennetuilla ja viemäröidyillä alueilla kuitenkin usein rankkasade

Hulevesien hallintarakenteiden, kuten viivytyks- ja laskeutusaltaiden mitoittamiseen ei ole Väyläviraston ohjeistuksessa annettu tarkkoja ohjeita. Viivytyks- ja laskeutusaltaiden suunnittelun lähtökohdat on esitetty ohjeessa seuraavasti: "...suurempien rankkasateiden ja sulamiskauden vedet tulevat altaaseen, josta ne virtaavat pois ahtaamman putken tai uoman kautta. Vähäisempien sateiden vedet mahtuvat virtaamaan sellaisenaan altaan läpi tai ohi." Lisäksi ohjeistuksen mukaan altaat mitoitetetaan 5-10 (suuremmat altaat) tai 3-5 (pienemmät altaat) vuoden välein toistuvien mitoitusasteiden tilavuudelle. (Liikennevirasto 2013a)

### 3.5.1 Mitoitussateen kesto ja toistuvuus

Mitoitussateen kesto valitaan mitoituslaitteen mukaan. Valinnassa tulee huomioida valuma-alueen koko ja ominaisuudet. Isoilla ja luonnonmukaisilla valuma-alueilla käytetään yleensä pidempiä sateita, kuin pienillä ja päällystetyillä valuma-alueilla. Hulevesien määrän tarkasteluun valitaan pitkäkestoinen sade, sillä kokonaissademäärä on suurimmillaan pitkäkestoisessa sateessa, vaikka sateen keskimääräinen intensiteetti olisi pieni. Huippuvirtaamien tarkasteluun valitaan lyhytkestoinen suuren intensiteetin sade eli rankkasade. Suurimmat virtaamat syntyvät yleensä silloin, kun sateen kesto on valuma-alueen viipymän suuruinen. Viipymä on aika, joka vedeltä kestää virrata valuma-alueen kaukaisimmasta kohdasta valuma-alueen purkautumiskohtaan. (Hulevesiopas 2012)

Väyläviraston ohjeistuksen (Liikennevirasto 2013a) mukaan mitoitusasteen kesto aika valitaan valuma-alueen koon perusteella siten, että valuma-alueen etäisimpään reunaan

satanut vesi ehtii valuma-alueen purkautumiskohtaan sateen aikana. Ohjeelliset kestoajat on esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4.** Väyläviraston ohjeistuksen mukaiset mitoitusasteen kestoajat (Liikennevirasto 2013a)

Valuma-alueen pinta-ala [ha]	Mitoitusasteen kesto aika [min]
< 2	5
2...5	10
5...20	20
20...100	60

Sadetahtuman toistuvuus on mitatun sadanta-aineiston perusteella määritetty todennäköisyys tietyn kestoisen ja tietyn intensiteetin omaavan sateen esiintymiselle. Toistuvuutena käytetään yleensä arvoja välillä 1/1 a – 1/100 a, eli kerran vuodessa toistuvasta sateesta kerran sadassa vuodessa toistuvaan sateeseen. Mitoitus on riskien ja kustannusten optimointia. Tavoitteena on käyttää sellaista toistuvuutta, että sekä kustannukset, että riski tulvimiselle ovat hyväksyttävällä tasolla. Jos halutaan, että riski mitoitettavan rakenteen tulvimiselle on mahdollisimman pieni, valitaan harvoin toistuva mitoitusaste. Tällöin kuitenkin järjestelmien koko kasvaa suureksi ja kustannukset kasvavat. (Kuntaliitto 2012)

Ilmastonmuutoksen johdosta sateen intensiteetit kasvavat ja tämä on mahdollista huomioida esimerkiksi valitsemalla harvemmin toistuva sadetahtuma. Jos oletetaan, että sateet kasvavat vuoteen 2100 mennessä 20 % nykytilanteesta, voidaan se huomioida toistuvuuden valinnassa käyttämällä 1/10 a sijaan 1/5 a sateen toistuvuutta. Väyläviraston ohjeistuksessa (Liikennevirasto 2013a) on otettu ilmastonmuutos huomioon päivittämällä toistuvuuden ohjearvoja. (Kuntaliitto 2012)

Mitoitusvirtaaman toistuvuus valitaan väylän merkittävyyden mukaan taulukossa 5 esitetyllä tavalla. Tavoitearvoa pyritään käyttämään uusien ja uusittavien rumpujen mitoittamiseen. Minimiarvoa voidaan käyttää kustannusten kasvaessa huomattaviksi tai jos veden pinnan nousun seurauksena syntyvät riskit jäävät pieniksi. Mikäli on olemassa riski veden tulvimiselle arvokkaille kohteille sillan tai rummun ylävirrassa, käytetään toistuvuuksia 1/100 (taajamat, merkittävät rakennuksen ja rakenteet) ja 1/250 (sairaalat, hoitolaitokset tai vaikeasti evakuoitavat kohteet). Sadevesiviemärin mitoituksessa mitoitusvirtaaman toistuvuuden tavoitearvo 1/10 ja minimiarvo 1/5. Ajokaistojen kuivatuksessa taajamien pääväylillä tavoitearvo on 1/20 ja minimiarvo 1/5. (Liikennevirasto 2013a)

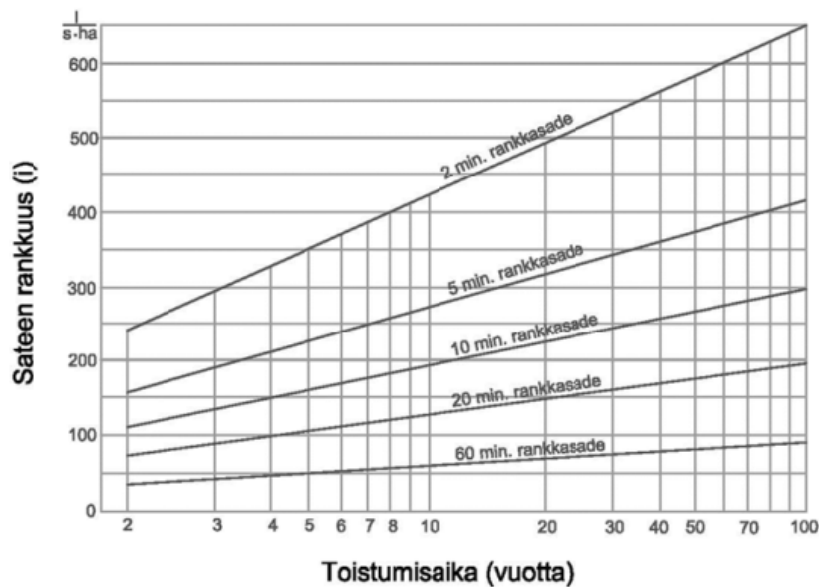
**Taulukko 5.** Väyläviraston ohjeistuksen mukaiset mitoitusasteen toistuvuudet (perustuu lähteeseen Liikennevirasto 2013a)

Suunnittelukohde	Mitoitusvirtaaman toistuvuus [a]	
	Tavoitearvo	Minimiarvo
<b>Rautatie, moottoritie</b>	1/100	1/100
<b>Valta- tai kantatie, ei varareittiä</b>	1/100	1/10
<b>Valta- tai kantatie, jolla on tulvariskitön varareitti</b>	1/20	1/5
<b>Seututie</b>	1/10	1/5
<b>Yhdystie</b>	1/5	1/2
<b>Yksityistiet</b>	1/2	1/1

### 3.5.2 Mitoitusasteen intensiteetti

Sateen intensiteetti eli rankkuus voidaan mitoitusasteessa olettaa tasaiseksi tai vaihtuvaksi. Intensiteettiä voidaan ilmaista esimerkiksi yksiköissä mm/min, mm/h tai l/s\*ha. Mitoituksessa käytetään useimmiten sateen keskimääräistä ja tasaista intensiteettiä. Keskimääräinen intensiteetti määritetään usein käyttämällä nomogrammeja tai taulukkoja, joista intensiteetti valitaan sateen toistuvuuden ja sateen keston mukaan (Kuntaliitto 2012). Väyläviraston ohjeistuksen (Liikennevirasto 2013a) mukaan mitoituksessa käytetään mitoitusasteen tasaista intensiteettiä, joka määritetään nomogrammin (kuva 8) avulla.

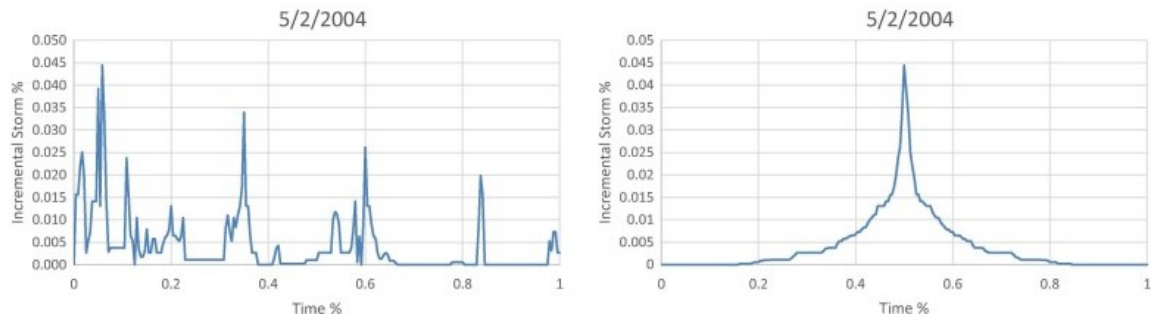
## Rankkasateen voimakkuus Suomessa



**Kuva 8.** Väyläviraston ohjeistuksen mukainen sateen tasaisen intensiteetin määrittäminen sateen rankkuuden ja toistuvuuden perusteella (Liikennevirasto 2013a)

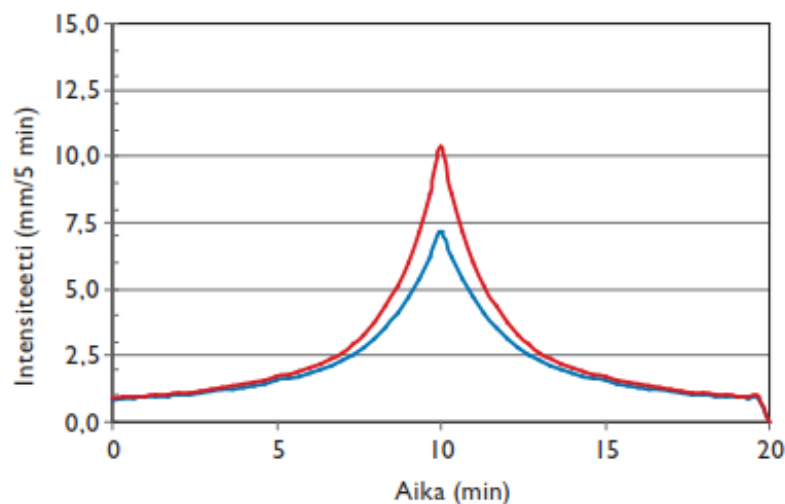
Sateen hetkellinen intensiteetti voi olla paljon voimakkaampi, kuin keskimääräinen intensiteetti ja se tulisi ottaa huomioon erityisesti hulevesien johtamiseen käytettävien rakenteiden mitoituksessa. Huleveden kokonaismäärään intensiteetin vaihtelu ei vaikuta, joten tilavuuden perusteella mitoitettaviin rakenteisiin intensiteetin vaihtelu ei vaikuta merkittävästi. (Kuntaliitto 2012)

Vaihtuvaintensiteettistä sadetapahtumaa voidaan kuvata hyetografilla, joka kuvaa sademäärän kertymää ajan suhteen. Alan kirjallisuudessa (Barbosa et al 2018; El-Sayed 2017) on esitetty monen tyyppisiä hyetografeja, joita ovat esimerkiksi suorakulmainen hyetografi (sateen tasainen ja keskimääräinen intensiteetti), yksihiippuinen keskitetty hyetografi, yksihiippuinen oikealle tai vasemmalle vino hyetografi, kaksihiippuinen hyetografi ja muodoton hyetografi.



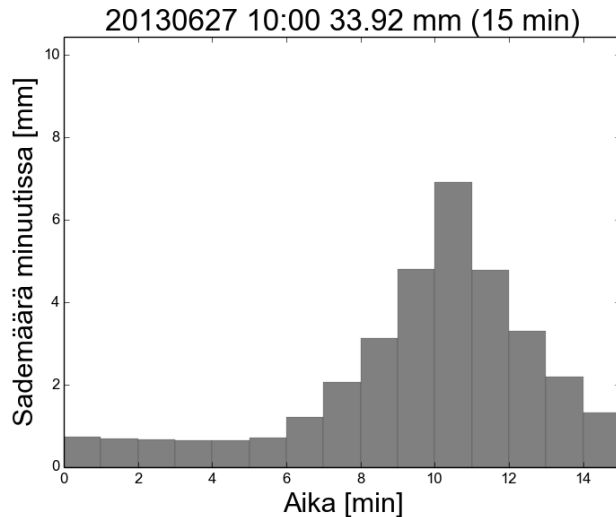
**Kuva 9.** Muodoton hyetografi (sadannan mittaustulokset aikajanalla) ja samasta sateesta muodostettu keskitetty hyetografi (sateen suurin intensiteetti on tapahtuman puolivälissä) (El-Sayed 2017)

Sateen intensiteetin vaihtelun kuvaamiseksi on kehitetty synteettisiä mitoitussateita todellisten rankkasateiden mittaustulosten pohjalta. Yksi tunnetuimmista synteettisistä mitoitussateista on Chicago Design Storm (CDS-sade). Aaltonen et al. (2008) on muodostanut Suomen olosuhteita vastaavat CSD-sateet kahden ja kolmen vuoden toistuvuudelle käyttäen Suomen vuosisadantaa (kuva 10).

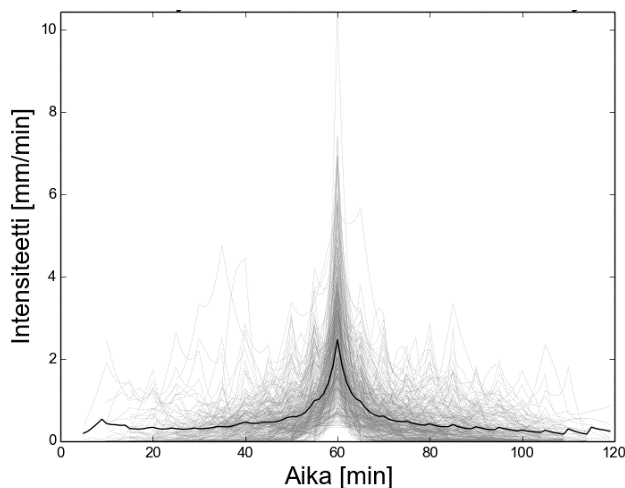


**Kuva 10.** 20 minuutin CDS-sateen hyetografi kahden vuoden toistuvuudelle nykyisellä (sininen) ja tulevalla ilmastolla (punainen), jossa sateiden oletetaan kasvavan 20 % (Aaltonen et al. 2008)

Mitoitussateena on mahdollista käyttää myös mittausten perusteella määriteltyjä intensiteettijakaumia eri kestoisille sateille (Kuntaliitto 2012). Rimpiläinen (2017) on kerännyt mitoitussateiden muotokirjaston. Muotokirjastoon on kerätty hyetografit erilaisista intensiteetiltään vaihtuvista rankkasateista vuosien 2013 – 2016 mittaussaineistosta Suomesta (kuva 11). Lisäksi mittaussaineisto on ladattavissa Excel-tiedostona. Aineisto on melko suppea ja käsittää vain kerran kolmessa vuodessa tai harvemmin tapahtuvia sateita. Rimpiläinen on tuottanut myös keskitettyjä keskiaikasarjoja eri pituisille sateille (kuva 12). (Ilmatieteenlaitos 2017b; Rimpiläinen 2017)



**Kuva 11.** Esimerkki mitoitusasteiden muutokirjaston viidentoista minuutista minuutin mitoitusasteesta. Kuvasta nähdään sateen intensiteetin vaihtelu ja sen yläpuolelle on merkitty sateen kokonaismäärä (33.92 mm) ja mittausajankohta (27.6.2013). Lisäksi sateesta on saatavilla tieto sijainnista ja toistuvuudesta. (Ilmatieteen laitos 2017b)



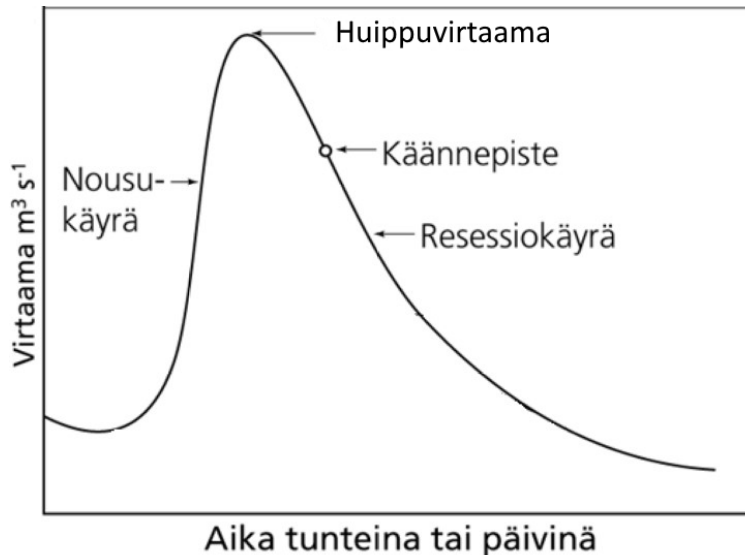
**Kuva 12.** Keskitetty keskiaikasarja tunnin sateille (Rimpiläinen 2017)

### 3.5.3 Sateen aiheuttaman mitoitusvirtaaman muodostumiseen vaikuttavat tekijät

Valuma-alueen ominaisuudet vaikuttavat siihen, kuinka suuri osa mitoitusasteesta muuttuu valunnaksi ja edelleen virtaamaksi saavuttaessaan uoman tai muun johtamisjärjestelmän osan. Myös sateen intensiteetti ja kesto vaikuttavat valunnan määrään, pääsääntöisesti siten että valunta kasvaa, mitä rankempaa ja pitkäkestoisempaa sade on (Kuntaliitto 2012). Virtaaman aikavaihtelua valuma-alueen purkautumispisteessä voidaan kuvata valuntakäyrällä (kuva 13). Valuntakäyrän korkein kohta kuvaa huippu- tai ylivirtaamaa, eli suurinta hetkellistä virtaamaa. Käännepisteessä merkittävä pintavalunta lakkaa



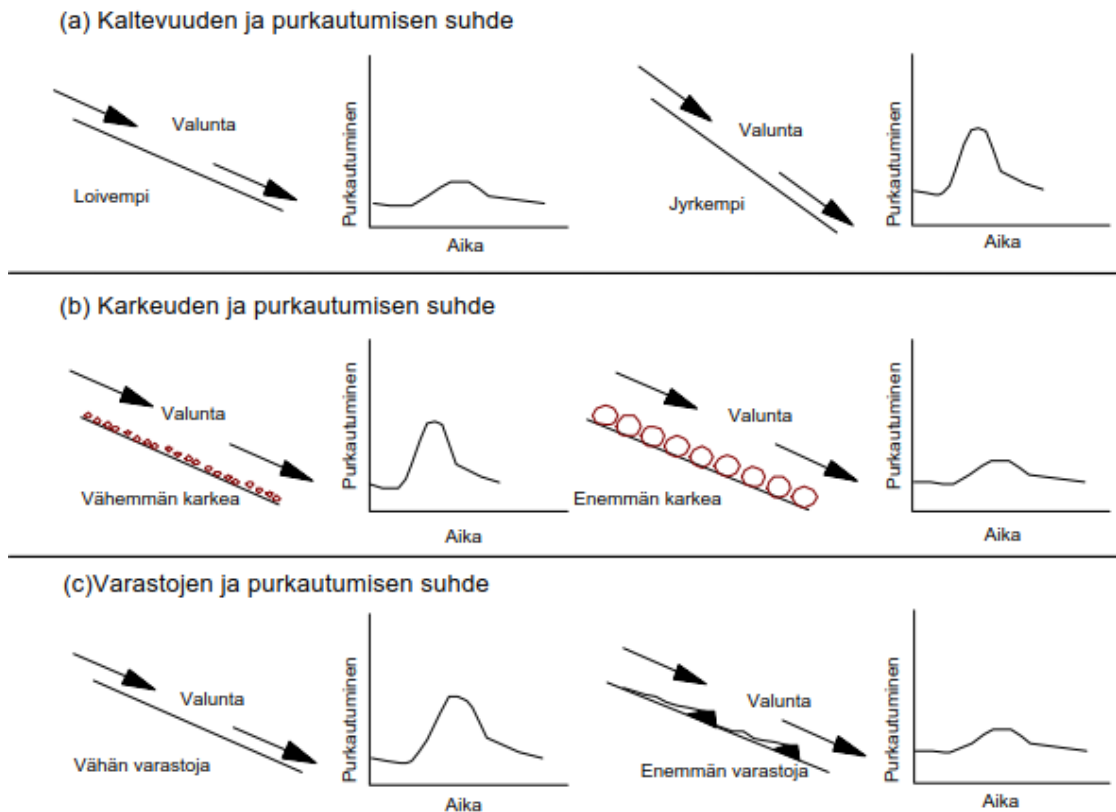
ja sen jälkeinen resessio- eli palautumiskäyrä kuvaa vesivarastojen tyhjenemistä. Sade-  
tapahtuman aiheuttama valuntamäärä voidaan määrittää valuntakäyrän alapuolisen alu-  
een pinta-alasta. (Johnson et al. 2002; Leppävirta et al. 2017)



**Kuva 13.** Tyypillinen lyhytaikaisen sateen valuntakäyrä ja sen keskeisimmät osat (perustuu lähteeseen Salaojayhdistys 2013)

Pintavalunta muodostuu sadannasta imeytymisen ja haihtumisen jälkeen, kuten luvussa 2.1 on kuvattu. Pintavalunnan valuma-alueelta purkautumiseen vaikuttavat imeytymisen ja haihdunnan lisäksi muun muassa valuma-alueen koko, kaltevuus, hydraulinen karheus, uomat ja kuivatusjärjestelmät, maaperän kosteusolosuhteet ja läpäisemättömän pinnan osuus. Valuma-alueen ominaisuudet vaikuttavat valunnan muodostumisnopeuteen ja -määrään eli valuntakäyrän muotoon. (Johnson et al. 2002)

Jyrkkä pinnan kaltevuus aiheuttaa veden nopean purkautumisen, jolloin valuma-aika on lyhyt, mutta huippuvirtaama suuri (kuva 14 kohta a). Jos taas kaltevuutta ei juuri ole, hulevesi ehti imeytyä maaperään ja purkautuneen veden kokonaismäärä voi vähentyä. Hydraulinen karheus kuvaa pinnan fyysisiä ominaisuuksia. Mitä sileämpää pinta on, sen nopeammin vesi poistuu pinnalta (kohta b). Vesi voi myös varastoitua valuma-alueella painanteisiin, uomiin tai kasvillisuuteen, mikä pienentää huippuvirtaamaa ja purkautuneen veden määrää (kohta c). Valuma-alueella sijaitsevat uomat ja kuivatusjärjestelmät nopeuttavat veden purkautumista valuma-alueelta. (Johnson et al. 2002)



**Kuva 14.** Valuma-alueen ominaisuuksien vaikutus valuntakäyrään (perustuu lähteeseen Johnson et al. 2002)

Maaperän kosteuspitoisuus sateen alkaessa vaikuttaa imeytymiseen. Jos maaperä on sateen alkaessa valmiiksi vedellä kyllästettyä, imeytymistä ei tapahdu ja pintavalunnan määrä kasvaa. Imeytymistä voidaan laskea esimerkiksi Hortonin menetelmällä, Green-Ampt-menetelmällä sekä SCS Curve Number -menetelmällä (Huber et al. 2016). (Butler et al. 2004)

Valuntakerroin, jota käytetään muun muassa rationaalisessa menetelmässä, on yksinkertaistettu tapa kuvata valuma-alueen ominaisuuksien vaikutusta hulevesien muodostumiseen. Se on valuma-alueen ominaisuuksien perusteella arvioitu suhdeluku, joka kuvaa valuma-alueelta pintavaluntana purkautuvan veden osuutta sataneesta vedestä erilaisten häviöiden jälkeen. Valumakertoimia on määritetty runsaasti erilaisille pinnoille ja aluetyypeille. Täysin vettä läpäisemättömälle pinnalle valumakerroin on yksi, kun taas esimerkiksi tiheäkasvuisen metsän valumakerroin on hyvin pieni (0,05). (Kuntaliitto 2012)

Väyläviraston ohjeistuksessa (Liikennevirasto 2013a) valumakerroin valitaan taulukon 6 mukaisesti. Valumakertoimet eivät ole täysin kuiville pinnoille, vaan oletuksena on, että sadetta on tullut jo muutama millimetri. Taulukossa kullekin pinnalle on esitetty valuma-arvon vaihteluväli. Pienintä arvoa käytetään lyhytaikaisen sadetapahtuman yhteydessä alueilla, joilla on pieni kaltevuus, paljon epätasaisuuksia ja maa on sula. Suurinta arvoa

käytetään sileäpintaisilla ja kaltevilla alueilla. Jos valuma-alue koostuu useasta erityyppisestä pinnasta, käytetään painotettua keskimääräistä valumakerrointa. (Liikennevirasto 2013a)

**Taulukko 6.** Väyläviraston ohjeistuksen mukainen valumakertoimen määrittäminen (Liikennevirasto 2013a)

Pinnan tyyppi	Valumakerroin C
<b>katto</b>	0,80...1,00
<b>asfalttipäällyste</b>	0,70...0,90
<b>tien nurmetetty luiska</b>	0,40...0,60
<b>avoin kalliomaasto</b>	0,30...0,50
<b>soratie, soraluiska</b>	0,20...0,50
<b>nurmipintainen piha, puisto</b>	0,10...0,40
<b>niitty, pelto, puutarha</b>	0,10...0,30
<b>suo</b>	0,05...0,15
<b>kumpuileva sekametsä</b>	0,05...0,20
<b>tasainen metsämaasto</b>	0,10...0,10
<b>tasainen sorakenttä</b>	0,00...0,05

### 3.5.4 Mitoitusvirtaaman laskenta rationaalisella menetelmällä

Rationaalinen menetelmä on yksinkertaisin menetelmä sateesta aiheutuneen huippuvirtaaman laskemiseen. Empiirinen kaava on kehitetty jo vuonna 1889 ja se on edelleen käytössä ympäri maailmaa (Badea et al. 2002). Esimerkiksi suurin osa Yhdysvaltalaisista suunnittelutoimistoista käyttää sitä (UDFCD 2018). Menetelmä soveltuu melko pienille (alle 80 ha) valuma-alueille. Rationaalisessa menetelmässä huippuvirtaama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$Q = CiA, \quad (1)$$

jossa C on valuma-alueen ominaisuuksista riippuva valuntakerroin, i on sateen intensiteetti [ $\text{m/s}$ ] ja A on valuma-alueen pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]. (Johnsson et al. 2002; May 2001)

Rationaalisessa menetelmässä on paljon oletuksia sen yksinkertaisuuden vuoksi. Tärkeimpiä oletuksia ovat:

- Huippuvirtaama saavutetaan, kun koko valuma-alue tuottaa valuntaa samanaikaisesti

- Mitoitussateen keston ollessa yhtä suuri kuin viipymä, saadaan suurin huippuvirtaama kyseisellä sateen toistuvuudella
- Sateen intensiteetti on vakio viipymän mukaisen sateen keston ajan
- Häviöt (kuten imeytyminen ja painannesäilyntä) valuma-alueella ovat homogeenisia ja pysyvät vakiona sateen keston ajan
- Kaavalla lasketulla huippuvirtaamalla on sama toistuvuus, kuin käytetyllä mitoitus- sateella (Johnsson et al. 2002)

Viipymä tarkoittaa aikaa (time of concentration  $T_c$ ), joka kuluu, kun valuma-alueen kauimmaisesta pisteestä lähtenyt vesi saavuttaa valuma-alueen purkautumispisteen. Sateen keston tulee olla vähintään viipymän pituinen, jotta koko valuma-alueelta syntynyt valunta ehtii saavuttamaan purkupisteen ja saavutetaan huippuvirtaama. Rationaalisella menetelmällä tarkastellaan yleensä pahinta mahdollista tilannetta (suurinta huippuvirtaamaa), joten mitoitus- sateen ei tulisi olla pidempi kuin viipymän, koska tilastollisesti pidemmillä sateilla on pienemmät intensiteetit, kuin lyhyillä sateilla. (Butler et al. 2004)

Rationaalisen menetelmään perustuvissa suunnitteluohjeissa määritetään yleensä ensin suunniteltavan kohteen valuma-alueen viipymä, ja sen jälkeen viipymän pituinen mitoitus- sateen kesto (Johnsson et al. 2002; Järvenpää et al. 2016; UDFCD 2018). Väyläviraston ohjeistuksessa (Liikennevirasto 2013a) ei ole esitetty ohjeita viipymän laskentaan, vaan sateen kesto valitaan valuma-alueen koon perusteella taulukon 4 avulla. Mitoitus- sateen keston ja toistuvuuden perusteella valitaan edelleen sateen intensiteetti.

Viipymä voidaan laskea erilaisin menetelmin. Huomioitavaa on, että eri laskentakaavat soveltuvat erilaisille valuma-alueille. Viipymä voidaan laskea esimerkiksi kinemaattiseen aaltoyhtälöön perustuvalla kaavalla 2, Kirpichin kaavalla 3 tai U.S. Federal Aviation Agencyn (FAA) kaavalla 4.

$$t_c = \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\frac{1}{n}} q^{\frac{1-n}{n}} \frac{1}{60}, \quad (2)$$

$$t_c = 0,0078 L^{0,77} S^{-0,385}, \quad (3)$$

$$t_c = 1,8(1,1 - C)L^{\frac{1}{2}} / 100S^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

joissa  $t_c$  on viipymä [min],

$x$  on valuma alueen pituus [m],

$S$  on valuma-alueen kaltevuus [m/m],

$\alpha$  on  $S^{1/2}/n$ ; ( $n$  on Manningin karkeuskerroin) [ $s/m^{1/3}$ ],

$n$  on kinemaattinen vakio (5/3),

$q$  on sateen intensiteetti [m/s],

L on valuma-alueen pituus [ft] ja

C on valumakerroin. (Järvenpää et al. 2016; Salimi et al. 2015)

Kirpichin kaava soveltuu pienille valuma-alueille ja se on alun perin kehitetty Tennesseessä perustuen maaseutumaisten valuma-alueiden mittauksiin. FAA on U.S. Federal Aviation Agency kehittänyt kaava, joka perustuu lentokentiltä mitattuun tietoon ja soveltuu pienille valuma-alueille, joissa valunta ei ole kanavoitunutta. (Salimi et al. 2015) Useissa lähteissä suositellaan käyttämään vähintään viiden minuutin mittaista viipymää mitoitussateen valinnassa, vaikka laskettu viipymä olisi pienempi (Badea et al. 2002; UDFCD 2018).

Rationaalinen menetelmä ei ota huomioon maaston kaltevuutta ja painannesäilyntää, joten niiden vaikutus tulisi arvioida valuntakerrointa valitessa (Liikennevirasto 2013a). Valumakertoimen C oletetaan pysyvän vakiona koko sadetapahtuman ajan, vaikka todellisuudessa sateen intensiteetti ja kesto vaikuttavat siihen (Mays 2001).

Rationaalinen menetelmä on kehitetty huippuvirtaamien arviointiin, mutta sitä sovelletaan myös esimerkiksi valunnan määrän arviointiin esimerkiksi valuntakäyrän avulla. Rationaalisella menetelmällä lasketun huippuvirtaaman ja viipymän perusteella pystytään tuottamaan myös valuntakäyrä. Tällöin oletetaan, että huippuvirtaama tapahtuu, kun on kulunut viipymän mukainen aika ja valunta loppuu, kun on kulunut kaksi kertaa viipymän mukainen aika. Valunnan oletetaan alkavan välittömästi sateen alettua ja nousevan lineaarisesti, kunnes huippuvirtaama saavutetaan ja vastaavanlaisesti laskevan lineaarisesti nolnaan. Valuntakäyrän muoto on kuitenkin approksimaatio, sillä rationaalinen menetelmä tuottaa vain yhden pisteen valuntakäyrään. (Johnsson et al. 2002; Pennington et al. 2012; UDFCD 2018)

Rationaalista menetelmää sovelletaan usein virheellisesti, koska menetelmän rajoituksista ja oletukset jätetään huomioimatta (Badea et al. 2002; Pennington et al. 2012). Eräät lähteet (NJDEP 2004; Government of Western Australia 2019) painottavat, että rationaalista menetelmää tulisi käyttää ainoastaan huippuvirtaaman arviointiin.

Rationaalinen menetelmä ei perustu koko sadetapahtuman kestoon, vaan siihen sateen kestoon, joka tuottaa huippuvirtaaman. Mikäli halutaan ottaa koko sateen kesto aika huomioon, voidaan käyttää modifioitua rationaalista menetelmää. Tällöin oletetaan, että huippuvirtaaman tuottava sateen kesto on sama kuin koko sateen kesto. (State of New Jersey 2004).

### 3.5.5 Kevätylivalumasta aiheutuva mitoitusvirtaaman laskenta ja siihen vaikuttavat tekijät

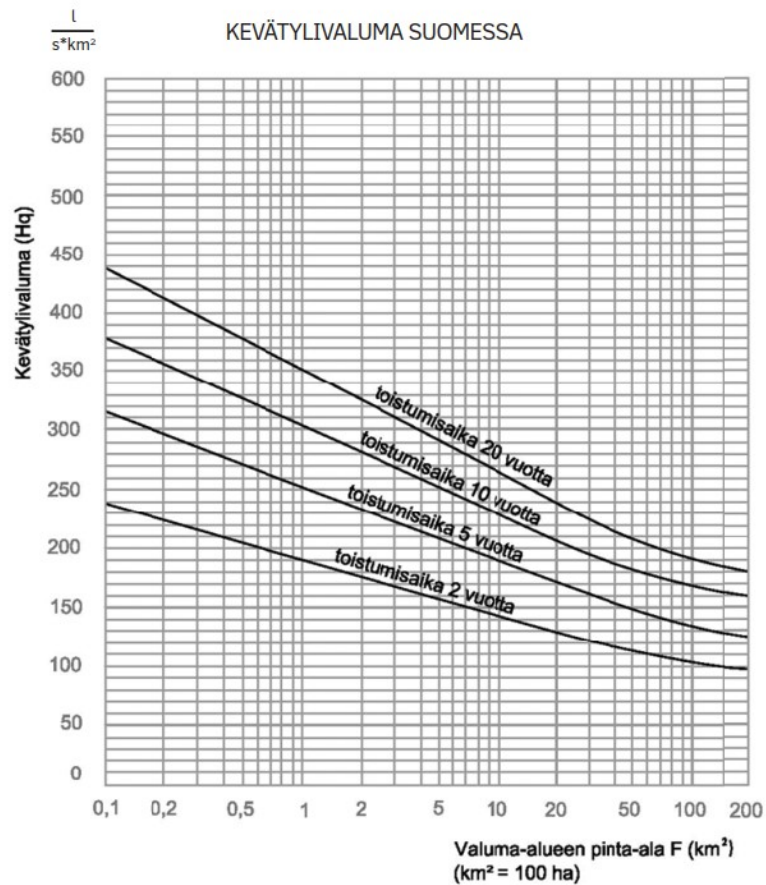
Lumen sulamisesta aiheutuvaa valumaa kutsutaan kevätylivalumaksi. Valuma muodostuu talvella lumipeitteeksi varastoituneesta sadannasta sekä lumen sulamisen aikaisesta sadannasta. Kevätylivaluman suuruus riippuu lumen vesiarvosta eli lumikerroksen paksuudesta vedeksi sulatettuna. Osa lumen sulamisvesistä voi imeytyä, mutta imeytyminen on varsinkin tiiviillä mailla vähäistä verrattuna sulamisvesimääriin. Paksu routakerros voi lisätä valunnan määrää ja kestoja. Kevätylivaluman muodostumiseen vaikuttavat myös samat tekijät, kuin sateen aiheuttaman valunnan muodostumiseen, mutta kevätylivaluman muodostumista tarkastellaan usein isommilta valuma-alueilta. Valuma-alueen järvisyys pienentää kevätylivalumaa, kun taas metsäojitus ja pellot lisäävät valumaa. (Karttunen 2003)

Väyläviraston ohjeistuksessa lumen tai rännän sulamisesta aiheutuva mitoitusvirtaama lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$Q = k_J * k_M * k_P * F * H_q , \quad (4)$$

jossa Q on virtaama [l/s],  $k_J$  on järvisyysskerroin,  $k_M$  on metsäojituskerroin,  $k_P$  on peltoisuuskerroin, F on valuma-alueen pinta-ala [km<sup>2</sup>] ja  $H_q$  on kevätylivaluma [l/(s\*km<sup>2</sup>)] (Liikennevirasto 2013a)

Kaavan 4 kevätylivaluma määritetään valuma-alueen kokoon ja kevätylivaluman toistuvuuden perusteella nomogrammin avulla (kuva 15). Lapissa ja Pohjois-Pohjanmaalla nomogrammeilla määritettyyn kevätylivalumaan käytetään kerrointa 1,3. Ylivaluman toistuvuus määritetään väylän merkittävyyden perusteella (taulukko 7). Valuma-alueelle määritetään järvisyys-, metsäojitusala- ja peltoalaprocentit, joiden avulla määritetään kertoimet  $k_J$ ,  $k_M$  ja  $k_P$  ”Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu” -ohjeesta löytyvillä taulukoilla. (Liikennevirasto 2013a)



**Kuva 15.** Väyläviraston ohjeistuksen mukainen kevätylivaluman määrittäminen (Liikennevirasto 2013a)

**Taulukko 7.** Väyläviraston ohjeistuksen mukainen kevätylivaluman toistuvuuden määrittäminen (Liikennevirasto 2013a)

Suunnittelukohde	Kevätylivaluman toistuvuus [a]	
	Tavoitearvo	Minimiarvo
Rautatie, moottoritie	1/100	1/100
Valta- tai kantatie, ei varareittiä	1/100	1/20
Valta- tai kantatie, jolla on tulvariskitön varareitti	1/20	1/10
Seututie	1/15	1/5
Yhdystie	1/10	1/5
Yksityistiet	1/2	1/1

### 3.5.6 Avo-uomien ja rumpujen mitoitus

Väylähankkeissa avo-ojat ja rummut ovat yleisimpiä kuivatusrakenteita. Avo-ojien mitoitustusta ei väylähankkeissa yleensä perustu mitoitusvirtaamaan, vaan muihin tekijöihin. Mikäli valuma-alue on yli 20 hehtaaria tulisi uoman koko tarkastaa ohjeistuksen mukaan hydraulisesti, jotta varmistutaan että uoman poikkileikkaus on sopiva suhteessa mitoitusvirtaamaan. Hydraulinen mitoitus tapahtuu Manningin kaavalla 5:

$$Q = \frac{A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}}}{n}, \quad (5)$$

jossa Q on mitoitusvirtaama [m<sup>3</sup>/s], A on veden poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>], R on hydraulinen säde [m], R = A/mätkä piiri, J on uoman pituuskaltevuus ja n on Manningin karkeuskerroin. (Liikennevirasto 2013a)

Rummuille on määritelty vähimmäiskoot Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnitteluohjeessa kunnossapitönäkökohtien mukaan. Rumpuaukon mitoitukselle on myös esitetty 1/20 vuoden toistuvuudella kevätylivalumaan, valuma-alueen kaltevuuteen ja uomankaltevuuteen perustuva mitoitusaulukko. Edellä mainittuja taulukoita voidaan käyttää suoraan rumpukoon mitoitukseen, jos uoman vieressä ei sijaitse asutusta eikä mitoituksessa käytettävän toistuvuusaika ole yli 20 vuotta. Rummun koko tulisi kuitenkin aina tarkastaa mitoitusvirtaamalla. (Liikennevirasto 2013a)

Rumpu kaventaa yleensä avouoman poikkileikkausta, mikä aiheuttaa padotusta rummun ylävirran puolelle ja kasvattaa virtausnopeutta. Liian suuri virtausnopeus syövyttää uomaa. Rumpujen mitoitusvirtaamaan perustuva hydraulinen mitoitus perustuu sallittuun padotuskorkeuteen eli mitoituspädotukseen. Mitoituspädotus ei yleensä aiheuta tulvan nousua uomassa. Mitoituspädotukset riippuvat ylävirran maankäytöstä ja uoman kaltevuudesta (taulukko 8).



**Taulukko 8.** Väyläviraston ohjeistuksen mukaiset mitoituspadotukset [m] maankäytön, uoman koon ja uoman kaltevuuden mukaan (Liikennevirasto 2013a)

Uoman kaltevuus [m/m]	< 0,0002	0,0005	0,001	0,002	0,005	>0,01
<b>Ylävirran maankäyttö: pelto, taajama tai merkittäviä rakennuksia</b>						
<b>Oja</b>	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,10
<b>Puro</b>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
<b>Joki</b>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
<b>Iso joki</b>	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
<b>Ylävirran maankäyttö: metsämaa tai luonnonalueet</b>						
<b>Ojat</b>	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,15
<b>Puro</b>	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,10
<b>Joki</b>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
<b>Iso joki</b>	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04

Rummun halkaisija määritetään siten, ettei mitoituspadotus ylitä. Väyläviraston ohjeistuksessa padotus lasketaan kaavalla, joka on johdettu Seunan k-menetelmästä. Seunan k-menetelmä perustuu Suomessa tehtyihin tutkimuksiin silta-aukkojen padotuksesta. Padotus lasketaan kaavalla 6. (Järvenpää et al. 2016; Liikennevirasto 2013a)

$$h = D * \frac{1}{2g} \left[ \left( \frac{Q}{kA_r} \right)^2 - \left( \frac{Q}{kA_u} \right)^2 \right], \quad (6)$$

jossa h on padotuksen korkeus rummun yläpäässä [m],

D on padotuskerroin (valitaan taulukosta 9)

g on maan vetovoiman kiihtyvyys (9,81 m/s<sup>2</sup>),

Q on laskettu mitoitusvirtaama [m<sup>3</sup>/s]

A<sub>r</sub> on rummun virtausala [m<sup>2</sup>] mitoitusvirtaamalla Q ilman padotusta

A<sub>u</sub> on yläpuolisen uoman virtausala [m<sup>2</sup>] mitoitusvirtaamalla Q padotuksen oletettu suuruus mukaan luettuna ja

k on vastuskerroin (valitaan taulukosta 9). (Liikennevirasto 2013a)

**Taulukko 9.** Padotuskertoimen ja vastuskertoimen valinta aukkosuhteen perusteella padotuksen laskentakaavan 6 (Liikennevirasto 2013a)

Aukkosuhte $A_r / A_u$	Padotuskerroin $D$	Vastuskerroin $k$	
		$Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$
0,3	0,79	0,67	0,71
0,4	0,72	0,70	0,74
0,5	0,65	0,73	0,77
0,6	0,58	0,77	0,81
0,7	0,51	0,80	0,84
0,8	0,43	0,83	0,87
0,9	0,34	0,86	0,90

### 3.6 Hulevesien mallinnus tietokoneohjelmilla

Rationaalisen menetelmän ja muiden yksinkertaisten menetelmien sijasta voidaan hulevesiä mallintaa ohjelmistoilla. Mallintamalla voidaan mitoitustapahtumaa tarkastella rationaalista menetelmää monipuolisemmin. Mallinnuksessa voidaan esimerkiksi ottaa huomioon sateen intensiteetin vaihtelu, tarkastella useita mitoitussadevaihtoehtoja, tarkastella mitä tapahtuu mitoituksen ylittävän sadetapahtuman seurauksena sekä tehdä herkkyyštarkasteluja esimerkiksi sademäärän tai viemäriverkoston osan tukkeutumisen suhteen. (Kuntaliitto 2012) Hulevesiviemäriverkoston mitoittamisessa mallinnuksen avulla voidaan lisätä tarkkuutta, koska mallinnuksessa voidaan ottaa huomioon esimerkiksi veden varastoituminen järjestelmiin (Karttunen 2004).

Hulevesien mallinnus tietokoneohjelmilla on tullut osaksi hulevesisuunnittelua jo 1970-luvun puolivälissä. Useat USA:n liittovaltion virastot kuten The Hydrologic Engineering Center (HEC) of the U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Soil Conservation Service (SCS) ja U.S. Environmental Protection Agency (EPA) ovat kehittäneet omia menetelmiään ja niitä käyttäviä tietokoneohjelmia, jotka ovat tulleet yleisesti käyttöön ympäri maailmaa. Virastojen kehittämät ohjelmat ovat usein ilmaiseksi ladattavissa ja sisältävät avointa lähdekoodia, eli myös kaupalliset toimijat voivat hyödyntää niitä. Nykyään onkin saatavilla paljon kaupallisia mallinnusohjelmia, jotka voivat sisältää yhden tai useita eri mallinnusmenetelmiä. Myös Euroopassa on kehitetty mallinnusohjelmia. Hulevesien mallinnusohjelmat voivat sisältää valuntamallin, virtausmallin, veden laatumallin tai niiden yhdistelmiä. (ASCE 1992; Butler et al. 2004)

Valuntamallilla kuvataan valuma-alueelta muodostuvaa mitoitustapahtuman aiheuttamaa valuntaa, virtaamaa ja niiden ajallista jakautumista. Valuntamallin syötteenä on sadanta ja tuotoksena valuntakäyrä. Valuntamallilla voidaan tutkia miten alueen maanpinnan muodot, maaperän ominaisuudet ja maan pintaominaisuudet vaikuttavat valunnan muodostumiseen. Valuntamalli voi esimerkiksi laskea sadannan muuttumisen valunnaksi rationaalisella menetelmällä tai valuma-alueet voidaan mallintaa säiliöinä, jotka vastaanottavat sateen ja muuttavat sen valunnaksi. Useilla mallinnusohjelmilla pystytään mallintamaan imeytymistä esimerkiksi Horton-, Green-Ampt- ja SCS Curve Number-menetelmillä. (Butler et al. 2004; Minnesota Pollution Control Agency 2017)

Virtausmallissa kuvataan veden virtausta verkostoissa tai uomissa. Mallilla voidaan tutkia esimerkiksi veden pinnan tasoja, virtausnopeuksia tai virtaamia järjestelmän eri osissa. Malliin voidaan syöttää tasainen virtaama tai valuntakäyrän mukainen virtaama. Virtausta voidaan laskea erilaisilla hydraulisilla laskentamenetelmillä. Virtauksen laskentamenetelmästä riippuen virtaus voi muuttua tai pysyä vakiona ajan ja paikan suhteen. (Minnesota Pollution Control Agency 2017; Rossman 2017)

Valunta- ja virtausmallin yhdistelmässä hyödynnetään molempien mallien ominaisuuksia. Virtausmalliin voidaan syöttää valuntamallilla laskettu valuntakäyrä. Veden laatua kuvaavia malleja käytetään haitta-aineiden kulkeutumisen tutkimiseen ja veden laadun vaikutuksen tutkimiseen purkuvesistöissä. (Minnesota Pollution Control Agency 2017)

Valunta-, virtaus- ja veden laatumallit eivät pysty kuvaamaan matemaattisesti eksaktisti luonnossa tapahtuvia monimutkaisia ja vaihtelevia prosesseja, vaan ne ovat aina yksinkertaistettuja. Mallin tarkkuus riippuu siitä, kuinka tarkkoja lähtötietoja malliin syötetään ja kuinka tarkasti mallilla pystytään kuvaamaan luonnon prosesseja. Malli voi sisältää virheitä liittyen mallin rakenteeseen, parametreihin tai laskentaan. (Ewen et al. 2006; Minnesota Pollution Control Agency 2017) Mallit tulisi lisäksi kalibroida vertaamalla mallinnuksen tuloksia alueella tapahtuvaan todelliseen sadantaa ja sen aiheuttamaan valuntaan. Tämän jälkeen mallin parametreja muutetaan siten, että malli tuottaa mahdollisimman hyvin mittaustuloksia vastaavan valunnan. Myös mallin validointi on tärkeää, eli kalibroitujen parametrien testaaminen sellaiseen aineistoon, jota ei ole käytetty kalibrointiin. (Aaltonen et al. 2008)

### **3.6.1 Mallinnuksen tavoitteet ja mallinnusmenetelmän valinta**

Ennen hulevesien mallinnusta ja mallinnusmenetelmän valintaa on määritettävä mallinnuksen tavoitteet. Tavoitteena voi olla esimerkiksi hulevesijärjestelmän tai tien kuivatuksen suunnittelu, laskeutus- tai viivytyksaltaiden mitoitus, sedimentaation ehkäisy tai veden

laadun tutkiminen. Myös suunnittelun taso tulee huomioida valinnassa, sillä mallin ei tarvitse olla yhtä tarkka esisuunnittelussa, kuin rakennussuunnittelussa. Mallinnusta voidaan käyttää suunnittelun lisäksi myös nykyisten kuivatusjärjestelmien tarkasteluun mahdollisten ongelmakohtien löytämiseksi ja ratkaisemiseksi. (ASCE 1992; Butler et al. 2004; Minnesota Pollution Control Agency 2017)

Mallinnuksen tarpeellisuutta sekä mallin monimutkaisuutta tulee harkita, sillä mallin lähtötietojen kerääminen, mallin rakentaminen, mallin kalibrointi ja verifointi sekä tulosten analysointi vaativat resursseja. Yksinkertaisten menetelmien etuja ovat nopeus, lähtötietojen vähyys ja helppokäyttöisyys. Monimutkaiset mallit vaativat asiantuntijuutta ja paljon lähtötietoja. Puutteellinen ymmärrys mallin käytöstä voi johtaa virheellisiin tuloksiin. Monimutkaisella mallinnusmenetelmällä voidaan tarvittaessa tehdä yksinkertaisempia analyyskejä jättämällä esimerkiksi vedenlaatuparametrit huomioimatta. Myös mallinnettavan alueen koko ja maankäyttö vaikuttavat mallin valintaan, sillä osa menetelmistä on kehitetty pienille kaupunkimaisille alueille ja osa laajoille maaseutumaisille alueille. (ASCE 1992; Minnesota Pollution Control Agency 2017)

Mallin valinnassa tärkeää on myös se, halutaanko mallintaa yksittäistä sadetapahtumaa vai jatkuvaa aikajaksoa. Vain osa ohjelmista pystyy simuloimaan pitkää aikajaksoa. Yksittäisen rankkasateen simulointia käytetään usein yksityiskohtaiseen suunnitteluun ja järjestelmien mitoittamiseen. Jatkuvia malleja käytetään simuloimaan alueen kokonaisvaltaista vesitasapainoa pitkällä aikavälillä. (Zuppou 2001). Jatkuvaan simulaation tarvitaan lähtötiedoksi jatkuvaa dataa sademääristä. Tällaista informaatiota on harvoin saatavilla ja siksi jatkuvien simulaatioiden sijaan käytetään usein mitoitusasteita. (Huber et al. 2016).

### **3.6.2 Mallinnusta koskeva ohjeistus ja tutkimus**

Hulevesien mallinnukseen ei ole annettu ohjeistusta Väyläviraston Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu -oppaassa (Liikennevirasto 2013a). Ohjeessa kuitenkin mainitaan, että mitoitusvirtaaman tarkempaan laskemiseen on olemassa ohjelmia, jotka ottavat huomioon myös valuma-alueen muodosta riippuvan viipymän ja varastoitumisen. Myöskään Kuntaliiton Hulevesioppaassa ei ohjeisteta mallinnusta, vaikka se oppaan mukaan on lähes välttämätöntä esimerkiksi tulvareittien ja tulvimispisteiden tarkastelussa (Suomen kuntaliitto 2012).

Ruotsissa maanteiden kuivatusjärjestelmien mitoittaminen on ohjeistettu Ruotsin Liikenneviraston oppaassa ”VVMB 310 Hydraulisk dimensionering”. Taajamamaisilla, paljon

(yli 3,75%) vettä läpäisemättömiä pintoja sisältävillä valuma-alueilla (ja alle 1 km<sup>2</sup> valuma-alueilla) käytetään joko ns. nettopintamenetelmää, rationaalista menetelmää tai ns. aika/pinta-alamenetelmällä. Aika/pinta-ala menetelmää suositellaan oppaassa käytettäväksi suuremmilla valuma-alueilla, joilla on ominaisuuksiltaan vaihtelevia osavaluma-alueita. Oppaassa suositellaan aika/pinta-alamenetelmän käyttöä, sillä menetelmällä voidaan ottaa valuma-alueiden ominaisuudet muita menetelmiä paremmin huomioon. Oppaassa on esitelty aika-pinta-ala menetelmän soveltamisen eri vaiheet sekä todettu, että virtaamien laskemiseen tulisi käyttää mallinnusohjelmaa. Mitään mallinnusohjelmaa ei kuitenkaan ole nimetty. (Vägverket 2008)

Pohjoismaisissa tutkimuksissa on tunnistettu tarve kehittää teiden kuivatussuunnittelua mallinnustyökaluilla, jotta ilmaston muutokseen voidaan sopeutua. Tiehallinnon esiselvityksen ”Ilmastonmuutokseen sopeutuminen tienpidossa” mukaan teiden kuivatussuunnittelua rankkasade- ja tulvatilanteita varten on tarve kehittää (Saarelainen et al. 2007). Selvityksessä on esitetty, että suunnittelussa tulisi käyttää valumamalleja, joiden avulla voidaan määritellä tarkemmin rumpujen ja silta-aukkojen mitoitusta poikkeustilanteissa, eroosion suojaustarvetta – ja rakenteita sekä tarpeellisia suojaustoimenpiteitä tulvan aikana. Ruotsissa on tutkittu ilmastonmuutokseen sopeutumista teiden kuivatuksen suunnittelussa (Kalantari et al. 2013). Tutkimuksessa todettiin, että on tärkeää kehittää ja ottaa käyttöön mallinnusohjelmia, joilla voidaan laskea huippuvirtaamia pienillä ja keski-suurilla valuma-alueilla.

Myös mallinnusohjelmien käyttöä on tutkittu Pohjoismaissa. Norjan liikenneviranomaisen (Statens Vegvesen) on rahoittanut ClimRunoff-projektin, jossa selvitettiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia infrastruktuuriin ja keskitytään talvisiin olosuhteisiin ja lumen sulamiseen. (Kramer 2015) Ruotsin liikennevirasto on rahoittanut hanketta Adaptation of Road Drainage Structures to Climate Change. Näiden kahden hankkeen välisessä yhteistyössä on tehty tutkimus neljän eri mallinnusohjelman käyttökelpoisuudesta huippuvirtaamien mallinnukseen tieympäristössä (Kalantari et al. 2012). Mallinnusohjelmat olivat LISEM, MIKE SHE, CoupModel ja HBV. Kriteerinä valituille ohjelmille oli muun muassa, että ne soveltuvat talvisien olosuhteiden mallintamiseen. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että mallinnustulokset voivat erota huomattavasti mitatuista virtaamista. Joissain tapauksissa yksinkertaisempi mallinnusohjelma (HBV) antoi parempia arvioita huippuvirtaamista, kuin monimutkaisemmat ohjelmat. Tutkimuksen perusteella mallin kalibrointimenettely ja parametrien epävarmuus vaikuttivat enemmän tuloksiin, kuin mallin rakenteellinen epävarmuus.

Taajaman ulkopuolisten liikenneväylien kuivatuksen mallintamista ei ole Suomessa tutkittu, mutta taajamien hulevesien mallinnusta on tutkittu Suomessa ja aiheesta on tehty

muun muassa diplomitöitä. Suomessa tehdyssä Rankkasateet ja taajamatulvat -hankkeessa (Aaltonen et al. 2008) on perehdytty taajamien hulevesimalleihin. Testatut mallit (MOUSE ja MIKE-SHE) soveltuivat Suomen oloihin taajama-alueilla ja hulevesimallien käyttöä suunnittelun apuvälineenä suositeltiin taajamissa. Raportissa nostettiin esille erityisesti lähtötietojen laadun tärkeys ja havaintoaineistoon perustuvan kalibroinnin tarpeellisuus luotettavien lopputuloksen saavuttamiseksi. Aaltonen et al. mukaan kunnollinen kalibrointi vaatii sadannan ja valunnan havaintoja vähintään kuudesta sadetapahtumasta valuma-alueen olennaisista kohdista. (Aaltonen et al. 2008)

## 4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Diplomityössä tutkittiin esimerkkikohteiden avulla hulevesien mallinnusohjelman käyttöä tien kuivatussuunnittelussa. Mallinnuksessa valuma-alueilta syntynyt hulevesivirtaama laskettiin valuntamallilla ja virtauksia kuivatusjärjestelmissä tarkasteltiin virtausmallilla. Huleveden laadun ja pohjaveden mallintaminen rajattiin työn ulkopuolelle. Valuntamallissa käytettiin kahta eri mallinnusmenetelmää. Esimerkkikohteet valittiin Kirri-Tikkakosken moottoritien tiesuunnitelmasta.

### 4.1 Mallinnusohjelma ja mallinnusmenetelmät

Tässä työssä käytettäväksi hulevesien mallinnusohjelmaksi valittiin kaupallinen Autodeskin Storm and Sanitary Analysis -ohjelma (SSA), joka on Civil3D:n lisäosa. Ohjelma valittiin, sillä se mahdollistaa monien eri mallinnus- ja laskentamenetelmien käytön. Lisäksi ohjelmaan on mahdollista tuoda lähtöaineistoa monissa eri tiedostoformaateissa.

SSA-ohjelmassa valunnan mallinnusmenetelmäksi valittiin rationaalinen menetelmä sekä Storm Water Management Model eli SWMM-menetelmä. Rationaalinen menetelmä valittiin, koska se on Väyläviraston ohjeistuksen mukainen menetelmä huippuvirtaamien laskentaan (Liikennevirasto 2013a). SWMM valittiin, koska se on monipuolinen ja maailman laajuisesti käytössä oleva menetelmä (EPA 2019). SWMM on käytössä monessa kaupallisessa ohjelmassa ja lisäksi se on avoimesti saatavilla EPA:n julkaisemana ilmaisena ohjelmana (Butler et al. 2004). Tutkimusta SWMM-menetelmän käytöstä on tehty erityisesti taajamien hulevesiin liittyen, mutta myös hyödyntämistä valtateiden ja maaseutumaisten alueiden kuivatussuunnitteluun on tutkittu (Moore et al. 2017).

#### 4.1.1 SWMM

SWMM on dynaaminen hulevesien mallinnusmenetelmä, jolla voidaan mallintaa yksittäisiä sadetapahtumia tai sadantaa tietyllä aikavälillä. SWMM:llä voidaan mallintaa vesi- ja lumisateita, lumen sulamista, pinta- ja pohjavesivaluntaa sekä virtaamaa. Mallissa valuma tarkastellaan osavaluma-alueittain ja syntyneen virtaaman kulkemista voidaan tarkastella putkijärjestelmissä, uomissa ja erilaisissa varastointi- ja käsittelyjärjestelmissä. EPA on kehittänyt SWMM:n vuonna 1971. SWMM on kehitetty alun perin kaupunkimaisen ympäristön tarpeisiin, mutta sitä voidaan soveltaa myös taajaman ulkopuolella. Tyy-

pillisiä sovelluksia joihin SWMM-menetelmää voidaan hyödyntää ovat kuivatusjärjestelmien suunnittelu ja mitoitus, laskeutus- ja viivytyjärjestelmien mitoitus, tulvareittitarkastelut ja veden laadun tarkastelut. (Mays 2001; Rossman 2015)

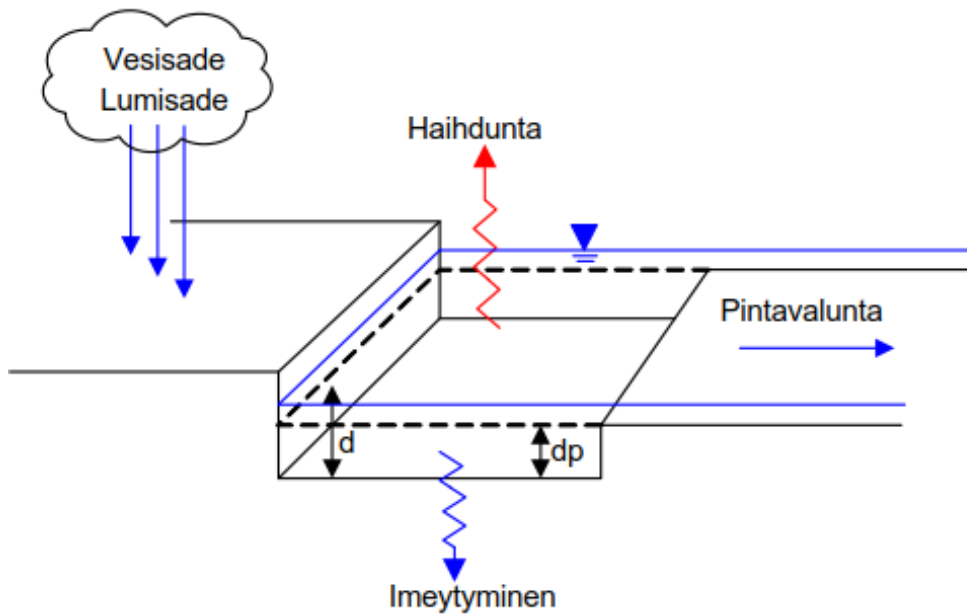
SWMM-menetelmässä vesi ja materiaali virtaavat neljän eri osion välillä, mutta mallinnuksessa ei ole välttämätöntä käyttää kaikkia eri osioita. Osiot ovat:

- ilmasto, joka sisältää sadetapahtumat ja sateen mukana laskeutuvat epäpuhtaudet,
- maanpinta, joka sisältää yhden tai useamman osavaluma-alueen, jotka vastaanottavat sateen vetenä tai lumena. Vesi imeytyy maahan tai jatkaa pintavaluntana ja epäpuhtauskuormana,
- pohjavesi, joka vastaanottaa imeytymisen,
- kuljetus, joka sisältää kuljetuselementit, kuten putket, pumput ja uomat sekä varastot ja käsittelyjärjestelmät. Virtaama tähän osioon voi tulla joko pintavalunnasta, pohjavesivirtaamasta tai käyttäjän määrittämästä valuntakäyrästä. (Rossman 2015)

Mitoitussateena voidaan käyttää SSA-ohjelman valmiita vaihtoehtoja, kuten Chicago Design Storm, tai ohjelmaan voidaan luoda omia hyetografeja tai ladata sateita ulkoisista tiedostoista. Sateen yksikkönä on mm/h ja se voidaan syöttää sateen kertymänä, sateen intensiteettinä tai sademääränä. (Autodesk® 2017)

SWMM:ssä käytetään epälineaarista säiliömallia (nonlinear reservoir model) kuvaamaan pintavaluntaa (kuva 16). Osavaluma-alueelle tuleva vesi on peräisin lumi- tai vesisaateesta tai mistä tahansa osavaluma-alueesta, joka on ylempänä kuin tarkasteltava alue. Vesi voi jatkaa matkaansa imeytymänä, haihduntana tai pintavaluntana. Osavaluma-alueen veden varastointikykyä kuvataan valuma-alueen painannesyvyyytenä (dp). Painannesyvyyden arvossa huomioidaan painanteet, maan pinnan vettyminen sekä interseptio. Pintavaluntaa syntyy vasta kun veden korkeus (d) ylittää valuma-alueen varastointikyvyn eli raja-arvon (dp). Pintavalunnan oletetaan käyttäytyvän kuten tasainen virtaama suorakulmaisessa uomassa ja valunnan määrä lasketaan Manningin kaavalla. (Autodesk® 2017; Rosmann 2015)

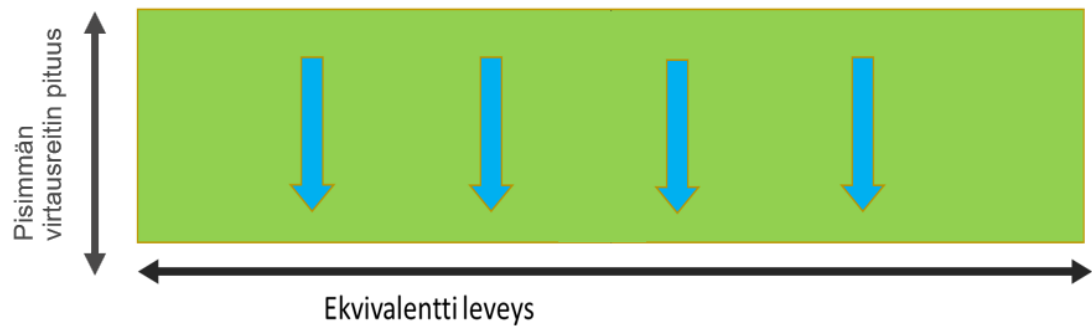




**Kuva 16.** SWMM- menetelmän pintavalunnan konseptuaalinen malli (Autodesk® 2017)

SWMM-mallissa yksi valuma-alue voi sisältää sekä läpäisevää, että läpäisemätöntä pintaa. Valuma-alueen tietoihin syötetään läpäisemättömän pinnan osuus prosentteina. Imeytymistä ei tapahdu lainkaan läpäisemättömiltä pinnoilta. Läpäisemättömään valuma-alueen osaan määritetään, kuinka monta prosenttia alueesta sisältää painannesäilyntää. Läpäisevällä valuma-alueen osalla painannesäilyntää oletetaan tapahtuvan koko alueella. (Autodesk® 2017; Rossman 2015)

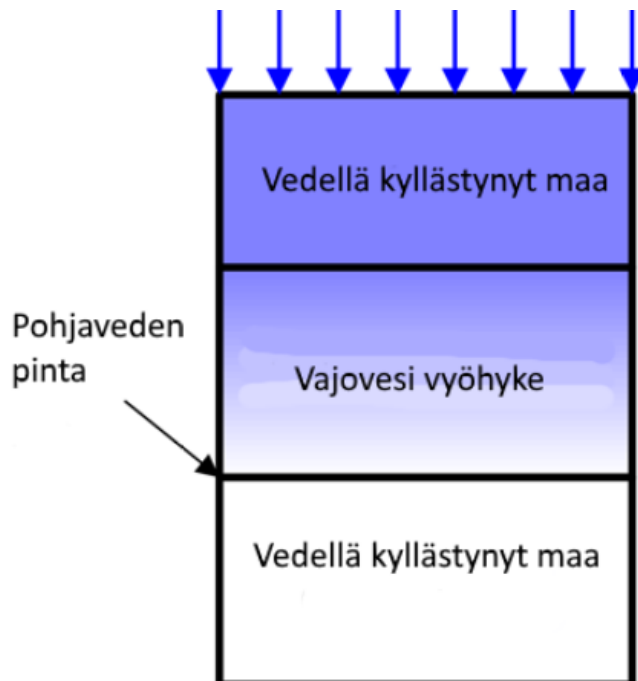
Osavaluma-alueet yksinkertaistetaan SWMM-menetelmässä suorakulmaisiksi alueiksi, joiden pinnan kaltevuus on vakio. Osavaluma-alueelle määritetään pinta-ala ja ekvivalentti leveys, joiden perusteella lasketaan osavaluma-alueen pisimmän virtausreitin pituus (Autodesk® 2017) Mikäli valuma-alue on suorakulmainen, ekvivalentti leveys on sen sivun pituus, joka on kohtisuoraan virtaussuuntaan nähden (kuva 17). Ekvivalentin leveyden määrittämisessä on huomioitava, että osavaluma-alueen pisimpään virtausreittiin ei tule huomioida kanavoitunutta virtaamaa. Luonnonmukaisilla alueilla pintavalunta muuttuu jo noin 150 metrin jälkeen kanavoituneeksi virtaamaksi. (Gironás et al. 2009)



**Kuva 17.** Suorakulmaisen valuma-alueen konseptuaalinen malli

SSA-ohjelmassa SWMM-menetelmää käytettäessä voidaan veden imeytymistä mallintaa Hortonin menetelmällä, Green-Ampt -menetelmällä tai SCS Curve Number -menetelmällä. Hortonin menetelmä perustuu empiirisiin havaintoihin, joiden mukaan imeytymisnopeus laskee pitkäkestoisen sadetapahtuman aikana eksponentiaalisesti maksiminopeudesta miniminopeuteen. (Rossman 2015) Menetelmä soveltuu käytettäväksi valuma-alueille, joissa imeytymiskapasiteetti on suhteellisen pieni, esimerkiksi taajamiin ja maanviljelysalueille. Hortonin menetelmä ei sovellu metsäalueille. (Autodesk® 2017)

Green ja Ampt -menetelmä perustuu Darcyn lakiin ja massan säilymislakiin (Mays 2001). Imeytymismallin periaate on esitetty kuvassa 18. Maaperässä vallitsee alkutilanteessa tasainen kosteuspitoisuus vedellä täysin kyllästyneen pinnan yläpuolella. Kun imeytyminen alkaa, maaperä kyllästyy yläoastaan vedellä ja vesi liikkuu tasaisena kosteusrintamana alaspäin (Autodesk® 2017)



**Kuva 18.** Veden Imeytymisen periaate Green ja Ampt -menetelmällä (Autodesk® 2017)

Green ja Ampt -menetelmän lähtöarvoja ovat vesipitoisuus kyllästymättömässä maakerroksessa alkutilanteessa, kyllästyneen maaperän vedenläpäisevyys sekä maalajin kapillaarinen nousukorkeus. Suositeltavinta on käyttää laboratoriokokeissa mitattuja arvoja. (Rossman 2015) Menetelmä ei ole täysin soveltuva metsäisille alueille (Autodesk® 2017).

SCS Curve Number -menetelmä perustuu entisen amerikkalaisen SCS:n (nykyään National Resource Conservation Service NRCS) empiiriseen valumamalliin. Menetelmässä käytetään numeroitua käyrästöä (curve number) maaperän kokonaisimeytymiskapasiteetin määrittämiseen. Kokonaisimeytymiskapasiteetti pienenee sateen kertymän mukaan. Käyränumerot on luokiteltu alueen maankäytön ja maaperän vedenläpäisevyyden perusteella. Mallintamisen lähtötietoja ovat käyränumerot, maaperän vedenläpäisevyys ja aika, joka kuluu vedellä kyllästyneen maan kuivumiseen. (Autodesk® 2017; Mays 2001; Rossman 2015) Menetelmä soveltuu myös metsäalueille ja on laajalti käytössä myös USA:n ulkopuolella. Menetelmällä ei kuitenkaan pystytä mallintamaan esimerkiksi lumen sulamista tai jäätyneelle pinnalle satavaa vettä. (Autodesk® 2017)

SWMM:n ilmastoparametreihin voidaan syöttää säähän liittyviä tietoja esimerkiksi lämpötilasta, haihtumisesta ja tuulen nopeudesta sekä lumen sulamisesta. Lumen sulamisen mallintamisessa malli ottaa huomioon lumen kertymisen ja sulamisen sekä lumen

siirron (esimerkiksi aurauksen). Valuma-alueet jaetaan kolmeen eri luokkaan lumen kertymisen ja sulamisen mukaan seuraavasti: aurattu alue, läpäisevä ja läpäisemätön. Valuma-alueelle voidaan määrittää lumikerros.

#### 4.1.2 Rationaalinen menetelmä

Rationaalisen menetelmän laskentakaava, oletukset ja muut periaatteet on kuvattu luvussa 3.5.4. Kaavalla 1 saadaan laskettua huippuvirtaama valumakertoimen, sateen intensiteetin sekä valuma-alueen pinta-alan perusteella. Mitoitussade voidaan syöttää SSA-ohjelmaan rationaalista menetelmää käytettäessä tasaisena intensiteettinä (mm/h).

Rationaalista menetelmää käytettäessä tulee ensin määrittää viipymän laskentamenetelmä tai määrittää se itse. Ohjelmassa on valittavissa seitsemän erilaista viipymän laskentamenetelmää, muun muassa jo aiemmin työssä esitetty Kirpichin menetelmä ja FAA-menetelmä. Ohjelmaan voidaan määrittää myös pienin sallittu viipymä, jota käytetään, jos laskennallinen viipymä on pienempi kuin tämä arvo.

SSA-ohjelma muodostaa rationaalista menetelmää käytettäessä valuntakäyrän huippuvirtaaman ja viipymän perusteella. SSA -ohjelma mahdollistaa myös käyrän nousevan ja laskevan osan muokkaamisen jyrkemmäksi tai loivemmaksi, jolloin huippuvirtaamaa ei saavuteta enää viipymän mukaisessa ajassa. (Autodesk® 2017).

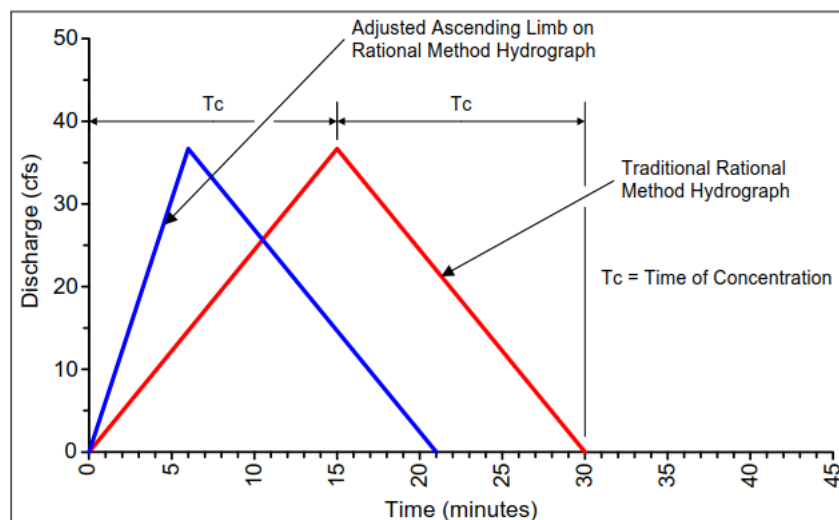


Figure 6.4 How the Ascending Limb Multiplier affects the Rational Method computed triangular hydrograph

**Kuva 19.** Rationaalisen menetelmän valuntakäyrä SSA-ohjelman oletusasetuksilla (punainen), jolloin huippuvirtaama saavutetaan, kun on kulunut  $T_c$ :n mukainen aika ja nousukäyrää muokattuna (sininen) (Autodesk® 2017)

### 4.1.3 Virtausmalli

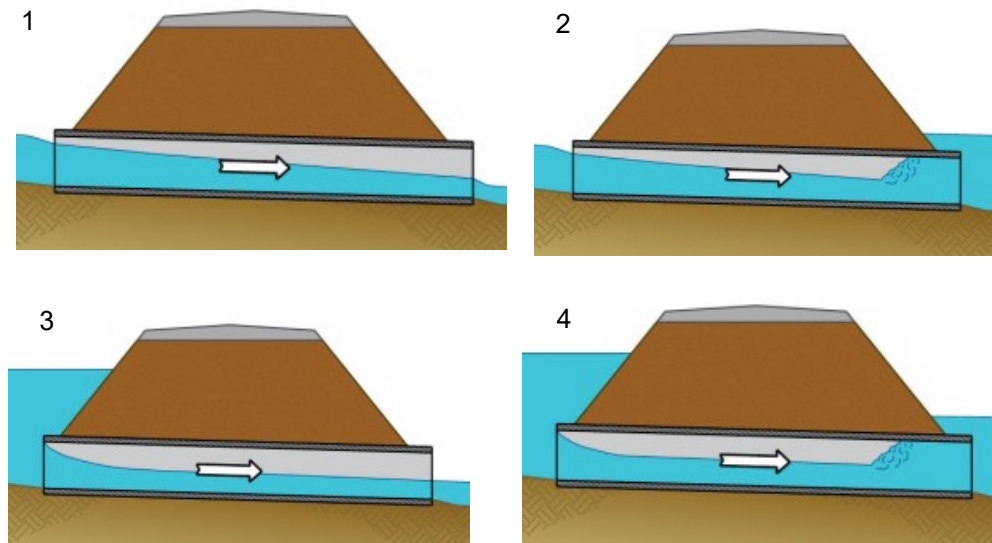
SSA-ohjelmassa virtauksen laskentaan voidaan käyttää stationääristä eli pysyvää virtausta, kinemaattista aaltoyhtälöä tai dynaamista aaltoyhtälöä. Stationäärisessä virtauksessa oletuksena on, että virtaama pysyy tasaisena ja muuttumattomana jokaisella laskennan aika-askeleella. Järjestelmään syötetty valuntakäyrän mukainen virtaama siirtyy muuttumattomana linkin alkupäästä loppupäähän, ilman viivettä tai muodon muutosta. Menetelmällä ei voida huomioida putken varastointikykyä, padotusta, takaisinvirtausta, putkihäviöitä eikä paineellista virtausta. Stationäärinen virtaus soveltuu vain yksinkertaisiin verkostoihin, joissa jokaisella solmulla on vain yksi poistumisreitti. Laskentamenetelmää suositellaan käytettäväksi vain laajojen simulaatioiden esitarkasteluun. (Rossman 2015)

Veden vaihtelevaa ja epätasaista avouomavirtausta putkessa tai uomassa voidaan laskea dynaamisella ja kinemaattisella aaltoyhtälöllä. Molemmat yhtälöt perustuvat Saint Venantin jatkuvuusyhtälöön ja liikemääräyhtälöön. Dynaaminen aaltoyhtälö ratkaisee täydellisesti nämä yhtälöt ja sillä saadaan teoreettisesti tarkimmat tulokset. Dynaamisella aaltoyhtälöllä pystytään myös laskemaan paineellista virtausta, takaisinvirtausta, padotusta, silmukoita, putkihäviöitä, tulvimista ynnä muita ilmiöitä. Menetelmän haittapuolena on numeerinen epästabilius tarkasteltaessa pitkiä aikajaksoja. Kinemaattinen aaltoyhtälö on yksinkertaistettu versio dynaamisesta aaltoyhtälöstä. Sillä ei voida mallintaa paineellista virtausta, takaisinvirtausta, nielu- ja purkautumishäviöitä eikä padotusta. Menetelmä soveltuu kuitenkin joihinkin tapauksiin, joissa halutaan mallintaa pitkiä aikajaksoja. (Rossman 2017)

Kaikki edellä mainitut virtauslaskentamenetelmät käyttävät Manningin kaavaa avouomavirtaaman virtausnopeuden suhteuttamiseksi virtausvyöhyteen ja karkeuskertoimeen. Paineellisissa järjestelmissä häviöiden laskentaan käytetään joko Hazen-Williamsin tai Darcy-Weisbachin kaavaa. Solmupisteissä aiheutuneet paikallishäviöt syötetään linkkeihin nielu- ja purkautumishäviönä. Virtaushäviötä syntyy esimerkiksi ojan supistuessa rummun kohdalla sekä poikkileikkauksen äkillisestä laajenemisesta. (Autodesk® 2017; Rossman 2017)

Rumpujen mallintamiseen SSA-ohjelma käyttää Federal Highway Administrationsin (FHWA) ohjeistukseen perustuvia laskentamenetelmiä. Oletuksena on, että virtaamaa rummussa rajoittaa joko rummun tuloaukko (inlet) tai lähtöaukko (outlet). Tulo- ja lähtöaukot voivat olla joko kokonaan veden alla tai osittain veden täyttämiä (kuva 20). Tulo-

aukon vaikutus virtaamaan riippuu pääasiassa rummun suuaukon geometriasta. Lähtöaukon vaikutus virtaamaan riippuu veden pinnan tasosta rummun alajuoksulla ja rummun vedenjohtokapasiteetista. (Autodesk® 2017)



**Kuva 20.** Erilaisia mahdollisia virtaustilanteita rummuissa. Kohdassa 1 kumpikaan rummun aukko ei ole veden pinnan alla. Kohdassa 2 lähtöaukko ja kohdassa 3 tuloaukko on veden pinnan alla. Kohdassa 4 molemmat aukot ovat veden pinnan alla mutta rumpu ei silti ole kokonaan täynnä vettä. (Schall et al. 2012)

#### 4.1.4 Mallin rakentaminen

Ennen mallinnuksen aloittamista SSA-ohjelmassa valitaan mallinnus- ja laskentamenetelmät sekä laskennassa käytettävät mittayksiköt. SSA:ssa valunta- ja virtausmalli koostuu kolmesta elementistä: valuma-alueet, solmupisteet (nodes) ja linkit (links). Solmupisteet ovat esimerkiksi liitoskohtia (junctions), kuten kaivoja tai rummun alku- ja loppupisteitä tai purkupisteitä (outfalls). Kun solmupisteet on määritelty, voidaan niiden välille lisätä linkki. Linkit voivat olla kuljetusverkostoa (conveyance link), kuten putkia, rumpuja tai avo-ojia, tai esimerkiksi pumppuja ja patoja. (Autodesk® 2017)

Osavaluma-alueet voidaan tuoda ohjelmaan LandXML-tiedostona tai ne voidaan piirtää suoraan ohjelmassa esimerkiksi taustakartan päälle. Malli voidaan rakentaa joko oikeaan mittakaavaan, tai konseptuaaliseksi malliksi. Mittakaavaan rakennetussa mallissa etuna on, että ohjelma laskee automaattisesti valuma-alueiden pinta-alat ja linkkien pituudet oikein. (Autodesk® 2017)

Solmupisteet ja linkit voidaan tuoda ohjelmaan eri tiedostoformaateissa, esimerkiksi LandXML-formaatissa tai ne voidaan määrittää SSA-ohjelmaan käsin. Jokaiselle linkille määritetään alku- ja loppukorkeudet, sekä poikkileikkaus tai halkaisija. Esimerkiksi avo-

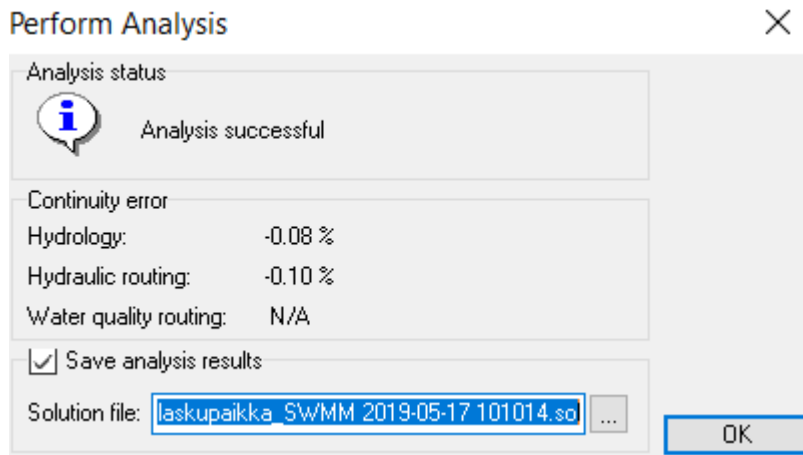
ojalle on valittavissa valmiita poikkileikkausvaihtoehtoja, kuten puolisuunnikas ja suorakulmio, tai voidaan käyttää itsemääritettyä poikkileikkausta. Linkeille määritetään myös Manningin karkeuskerroin sekä nielu- ja purkautumishäviöt. Ohjelmassa voidaan käyttää myös suoraa linkkiä, jonka kautta vesi siirtyy suoraan elementistä toiseen ilman häviöitä. Solmupisteille määritetään pohjan korkeus sekä maksimikorkeus. Jos tulviminen halutaan mallintaa, myös tulvimispinta-ala tulee määrittää. (Autodesk® 2017)

#### **4.1.5 Laskenta ja tulosten tarkastelu**

Kun mallinnettava kohde on kuvattu valunta- ja virtausmalliin, voidaan edetä laskentaan. Ensimmäiseksi laskennassa asetetaan laskennan aika-askeleet valunnalle, virtaamalle ja raportoinnille. Mitä lyhyempää aika-askelta käytetään, sen tarkempia mallinnustuloksia saadaan. Rationaalisessa menetelmässä laskennan aika-askelia ei voi muuttaa oletusasetuksista. (Autodesk® 2017)

Laskennan aika-askeleen valinnassa tulee ottaa huomioon valittu hydraulinen laskentamenetelmä. Dynaamiseen aaltoyhtälöön tulee syöttää pienempi aika-askel, kuin muihin laskentamenetelmiin. Tyypilliset arvot ovat minuutin ja yhden sekunnin välillä. Dynaamista aaltoyhtälöä varten ohjelmassa on myös lisäasetuksia, joilla voidaan vaikuttaa menetelmän stabiiliuteen. (Autodesk® 2017) Laskennan kesto kannattaa määrittää pidemmäksi, kuin mitoitussateen kesto, jotta voidaan tarkastella valuntaa myös sateen loputtua. Laskennan kesto valitaan syöttämällä aloitus- ja lopetusajankohdat.

Laskenta suoritetaan klikkaamalla Perform Analysis -painiketta. Laskennan onnistuessa (kuva 21) tulokset voidaan tallentaa erillisenä tiedostona. Epäonnistuneen laskennan jälkeen voidaan tarkastella virheraporttia. Laskennassa voi tapahtua jatkuvuushäiriöitä (continuity error), jotka voivat johtua esimerkiksi liian pitkästä laskennan aika-askeleesta. Mikäli jatkuvuushäiriöt ylittävät tietyn sallitun tason, esimerkiksi 10 %, on syytä tarkastaa tulosten oikeellisuus. (Autodesk® 2017)



**Kuva 21.** Ilmoitusikkuna valunta- ja virtauslaskennan onnistumisesta ja jatkuvuushäiriöistä

Hulevesien mallinnuksen tuloksia voidaan tarkastella SSA-ohjelmassa monella tavalla. SSA-ohjelmassa järjestelmien kapasiteetin laskenta perustuu mallinnetun huippuvirtaaman ja Manningin kaavalla lasketun virtauskapasiteetin suhteeseen sekä mallinnettujen veden korkeuksien ja järjestelmien maksimiveden korkeuksien suhteisiin seuraavien periaatteiden mukaisesti:

Kapasiteetti putkessa, rummussa ja uomassa on riittävä (tuloksissa "calculated"), kun:

- huippuvirtaama on pienempi kuin linkin laskennallinen virtauskapasiteetti ja
- veden virtauskorkeus on pienempi kuin linkin maksimivedenkorkeus.

Kapasiteetti on ylitetty putkessa ja rummussa (tuloksissa ">capacity"), kun:

- huippuvirtaama on suurempi kuin linkin laskennallinen virtauskapasiteetti ja
- veden virtauskorkeus on pienempi kuin linkin maksimivedenkorkeus.

Kapasiteetti on ylikuormittunut putkessa ja rummussa (tuloksissa "surcharged" ja punainen väri), kun:

- veden virtauskorkeus on yhtä suuri kuin linkin maksimivedenkorkeus (eli putki tai rumpu on täynnä vettä).

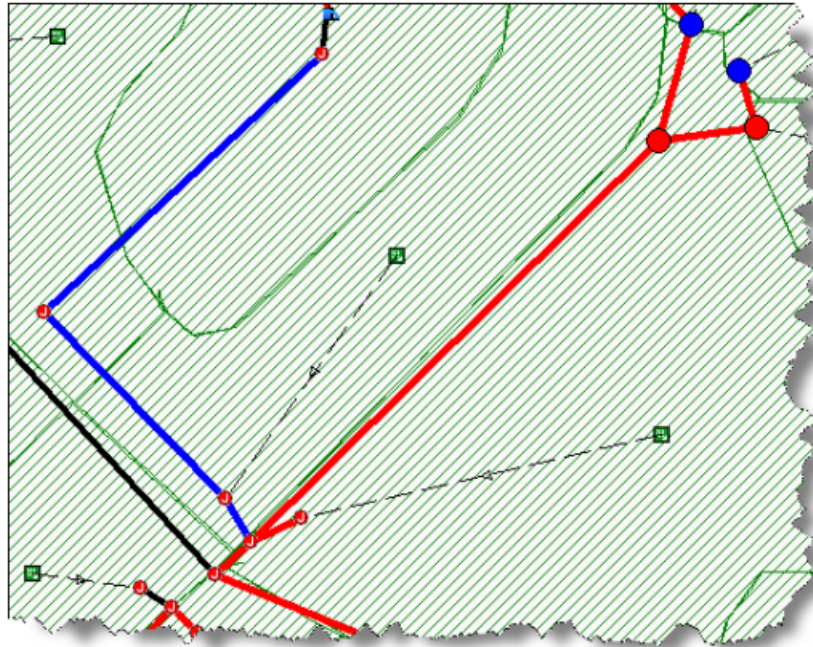
Uoma tulvii (tuloksissa "flooded" ja sininen väri), kun:

- veden virtauskorkeus on yhtä suuri kuin linkin maksimi vedenkorkeus (eli veden korkeus ylittää tulvakorkeuden). (Autodesk® 2017)

Laskennan jälkeen ohjelman perusnäkyssä (kuva 22) voidaan tarkastella visuaalisesti järjestelmän kapasiteettia. Vastaavalla tavalla perusnäkyssä esitetään myös

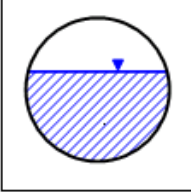


solmupisteiden kapasiteettipuutteet. Solmupisteet tulvivat, mikäli veden korkeus solmupisteessä ylittää tulvakorkeuden. Solmupisteet voivat myös ylikuormittua, jos kyseessä on kannellinen kaivo.



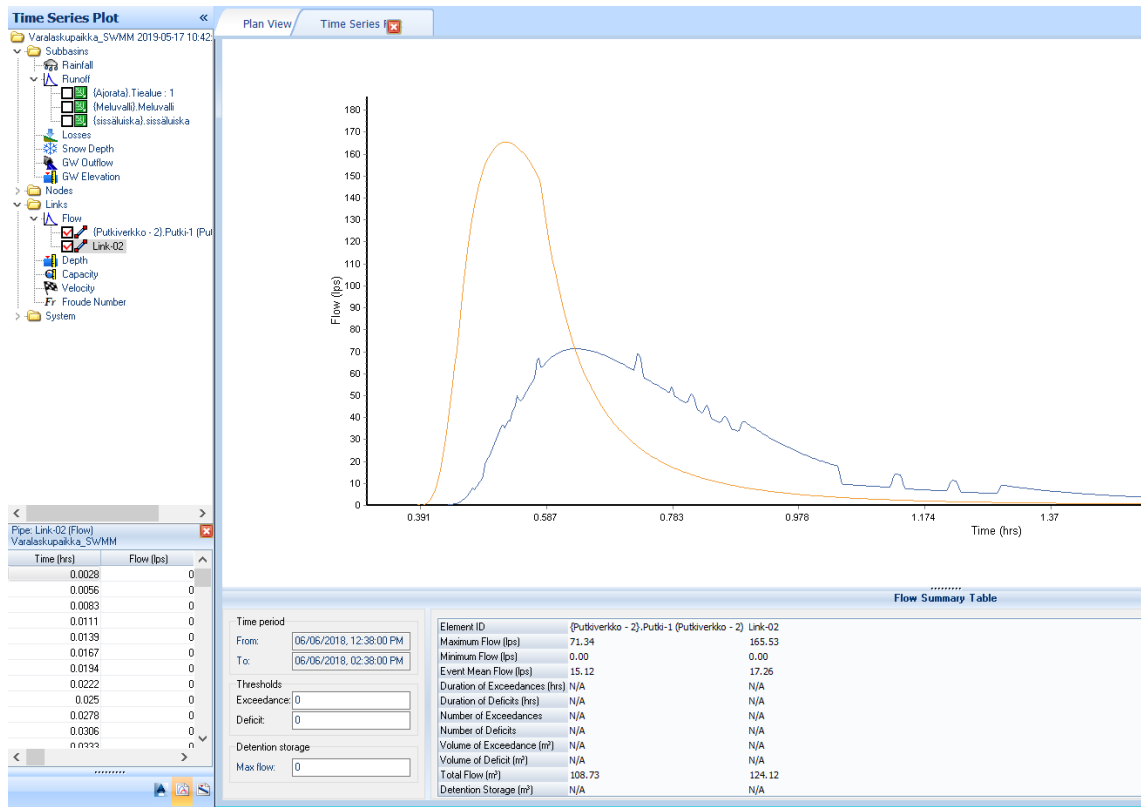
**Kuva 22.** Virtauslaskennan jälkeen nähdään tulvineet (sininen) ja kapasiteetin ylittäneet (punainen) elementit ohjelman perusnäkymästä (Autodesk® 2017)

Tuloksia voidaan tarkastella tarkemmin myös yksittäisten valuma-alueiden, solmupisteiden tai linkkien näkymissä (kuva 23). Niiden kuvakkeita klikkaamalla avautuu laatikko, jossa on elementille syötetyt lähtötiedot sekä laskennan yhteenveto, jossa on esitetty keskeisimpiä laskentatuloksia kyseistä mallin elementistä. Valuma-alueista on esitetty huippuvirtaama, kokonaisvalunta sekä kokonaisimeytymä. Linkeissä analyysin jälkeen on yhteenvetona esitetty muun muassa laskennallinen virtauskapasiteetti, huippuvirtaama, jäljellä oleva laskennallinen virtauskapasiteetti sekä virtauksen maksiminopeus. Solmupisteissä yhteenvetona on esitetty maksimivedenkorkeus, pisteeseen tullut huippuvirtaama sekä tulvineen veden määrä ja tulvimisaika.

Shape		Properties	
		<input type="radio"/> Open channel <input type="radio"/> Pipe <input checked="" type="radio"/> Culvert <input type="radio"/> Direct Circular	
		Number of barrels: 1 Culvert type: Concrete Pipe Culvert Culvert entrance: Square edge with head Diameter: 40.000 cm	
Physical properties		Flow properties	
Length:	18.19 m	Entrance losses:	0.2
Inlet invert elevation:	110.9 m	Exit/bend losses:	0.5
Outlet invert elevation:	110.5 m	Additional losses:	0
Manning's roughness:	0.015	Initial flow:	0 lps
<input type="checkbox"/> Flap gate		Maximum flow:	0 lps
Analysis summary			
Constructed slope:	0.0220 m/m	Max velocity attained:	3.18 m/sec
Design flow capacity:	267.73 lps	Max/design flow ratio:	1.49
Peak flow during analysis:	399.90 lps	Max/total depth ratio:	1.00
Additional flow capacity:	Surcharged lps	Total time surcharged:	0 min
Connectivity			
From (Inlet):	Jun-15	Swap	Invert elevation: 110.9 m
To (Outlet):	Jun-16		Invert elevation: 110.5 m

**Kuva 23.** Lähtötieto- ja laskentatulostaatikko rummusta. Rummun kapasiteetti on ylikuormittunut eli mallinnettu veden virtauskorkeus on yhtä suuri kuin linkin maksimi vedenkorkeus (Max/total depth ratio = 1,00).

Mistä tahansa mallin osasta voidaan tarkastella myös graafista aikasarjaa (time-series plot) (kuva 24). Tuloksia voidaan myös tuoda taulukkona Exceliin tai kuvaajina dwg-muotoon. Veden virtausta voidaan tarkastella virtausreitistä muodostetussa pituusleikkauksessa (profile plot), johon saadaan näkyviin myös animaatio, jossa näkyy veden virtausvaihtelu ajan mukaan. Pituusleikkauksen voi tallentaa myös dwg-tiedostona.



Kuva 24. Aikasarja kahden eri linkin virtaamasta

## 4.2 Kohteiden kuvaus ja niiden valunta- ja virtausmallit

Hulevesien mallinnusta tutkittiin kahdessa esimerkkikohteessa, jotka kuuluvat Valtatie 4 parantamiseksi laadittuun on tiesuunnitelmaan "Vt4 Jyväskylä - Oulu rakentaminen moottoritieksi välillä Kirri-Tikkakoski, Jyväskylä ja Laukaa". Tiesuunnitelma on laadittu vuonna 2014 ja hyväksytty toukokuussa 2015.

Valtatie kuuluu valtakunnalliseen TEN-T ydinverkkoon, eli on osa kansainvälistä korkeatasoista liikenneverkostoa. Liikennemäärät valtatiellä 4 Kirrin kohdalla ovat noin 20 000 ajoneuvoa/vrk. Raskaan liikenteen osuus on noin 10 % liikennemäärästä ja tie on Suomen tärkeimpiä raskaan liikenteen pääväyliä. (Väylävirasto 2018)

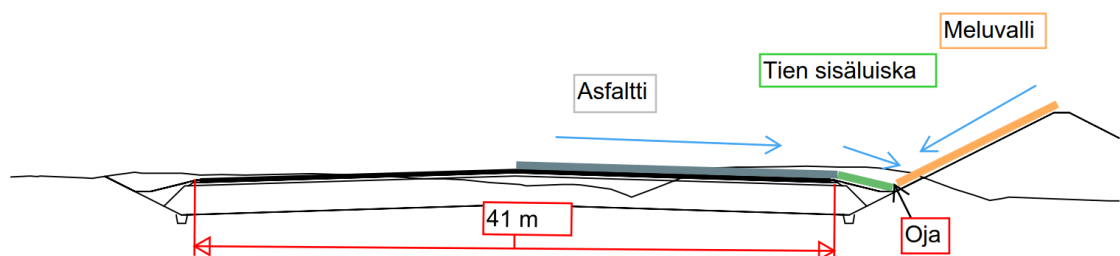
Moottoritien tiesuunnitelmassa on esitetty rummut, laskuojat ja muut kuivatusjärjestelmät suunnitelmakartoilla. Pohjaveden suojausalueesta on tehty erillinen kuivatussuunnitelma, jossa on edellä mainittujen lisäksi esitetty myös pohjaveden suojausrakenteiden sijainti sekä veden virtaus suunnat. Lisäksi suunnitelma-aineistoon kuuluu muun muassa rumpuluettelo, jossa on esitetty tarkemmin rummun korot, sijainti, sekä koko ja materiaali.

#### 4.2.1 Kohde 1. Lentokentän varalaskupaikan sivuoja ja rumpu

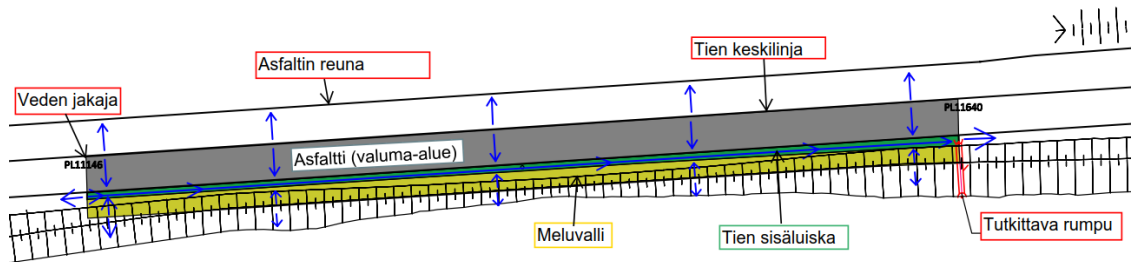
Esimerkkikohde 1 on Jyväskylän lentoaseman läheisyyteen suunniteltu lentokentän varalaskupaikka. Varalaskupaikka on 1,7 km pitkä ja asfalttipäällysteen leveys varalaskupaikalla on 41 metriä. Moottoritie on varalaskupaikan kohdalla kaksipuoleisesti sivukalteva (3 %) ja tien pituuskaltevuus on 2 %. Varalaskupaikan länsipuolella on meluvalli. Meluvallin ja varalaskupaikan välissä on sivuoja, josta kuivatusvedet johdetaan rummuilla meluvallin toiselle puolelle.

Lentokentän varalaskupaikka valittiin hulevesien mallintamisen esimerkkikohteeksi, koska kohteella on tavanomaiseen moottoritiehen verrattuna huomattavasti enemmän päällystettyä, vettä läpäisemätöntä pintaa. Näin ollen hulevesimäärät kohteella ovat tavallista moottoritiekohdetta suurempia. Hulevesimallinnuksessa tutkittava kohde rajattiin tarkemmin yhteen meluvallin alittavaan rumpuun, sivuojaan ja niiden valuma-alueeseen. Tutkittava kohde oli siis melko yksinkertainen, joten mallinnuksessa pystyttiin tarkastelemaan valitun ohjelmiston ja valittujen menetelmien perusominaisuuksia sekä vertailemaan rationaalisen menetelmän ja SWMM-menetelmän eroja.

Varsinainen meluvallin alittavan rummun valuma-alue jaettiin kolmeen osavaluma-alueeseen, pintojen kaltevuuksien ja valuntaominaisuuksien mukaan. Osavaluma-alueet ovat asfalttialue, jonka leveys on puolet koko varalaskupaikan poikkileikkauksen leveydestä, tien sisäluiska ja meluvallin tien puoleinen osa (kuvat 25 ja 26). Tien sisäluiskan ja meluvallin välissä on tien sivuoja, jota pitkin vesi virtaa rumpuun. Tiesuunnitelmassa rummun halkaisijaksi oli suunniteltu 400 mm. Hulevesimallinnuksessa tutkittu valuma-alueen kokonaispinta-ala on noin 1,8 hehtaaria.



**Kuva 25.** Poikkileikkaus lentokoneen varalaskupaikalta (esimerkkikohde 1). Siniellä nuolella merkitty veden valumissuunta ja harmaalla (asfaltti), vihreällä (sisäluiska) ja oranssilla (meluvalli) osa-valuma-alueet.



**Kuva 26.** Kartta lentokoneen varalaskupaikalta (esimerkkikohde 1). Sinisellä nuolella merkitty veden valumis- ja virtaussuunta ja harmaalla (asfaltti), vihreällä (sisäluiska) ja keltaisella (meluvalli) osa-valuma-alueet, joista vesi purkautuu ojaan ja kulkee ojaa pitkin rumpuun.

Tien sivuoja ja rumpu mallinnettiin SSA-ohjelmaan linkkielementteinä. Linkkien korkotiedot saatiin tiesuunnitelma-aineistosta. Ojaelementti mallinnettiin ojan pituuden puolikkaan mittaisena, koska valuma-alueilta valunut vesi kulkee keskimäärin vain puolet ojan mitasta. Ojan poikkileikkaus määritettiin suunnitelman mukaisena pohjan leveyden, luiskien kaltevuuden ja ojan syvyyden perusteella. Ojan syvyydeksi valittiin keskimääräinen ojan pohjan ja asfaltin reunan välinen etäisyys eli 0,75 m. Ojan poikkileikkaukseen laskettiin kuuluvaksi koko tien sisäluiska ja osa meluvallia. Tiesuunnitelmassa esitetty rummun halkaisija on 400 mm.

Varalaskupaikan hulevesimalli rakennettiin siten, että vesi valuu asfalttialueelta sisäluiskaan ja sisäluiskasta ja meluvallista ojaan. Koska linkkielementillä ei voida mallintaa veden imeytymistä, on tien sivuoja huomioitu sekä valuma-alueena että linkkinä. Koska valuma-alueita ei voi rationaalisessa menetelmässä linkittää toisiinsa, linkitettiin asfalttialueen valuma rationaalisessa menetelmässä suoraan ojan alkupisteeseen.

Jokaisen linkin päässä on solmupiste, eli solmupisteet ovat ojan alkupiste, rummun alkupiste (eli ojan loppupiste) sekä rummun loppupiste. Rummun loppupiste on tarkasteltavan järjestelmän purkupiste. Solmujen maksimikorkeudeksi valittiin ojan pohjan korko, johon lisättiin ojan syvyys 0,75 m. Ojan päiden solmuissa sallittiin tulviminen. Hulevesi siis tulvii mallin mukaan ajoradalle, jos solmupisteen maksimikorkeus ylitetään.

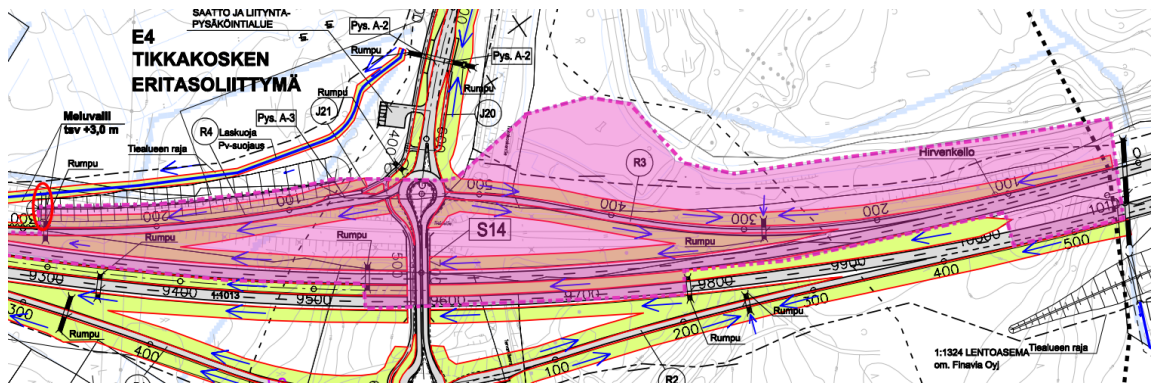
#### 4.2.2 Kohde 2. Eritasoliittymä pohjavedensuojausalueella

Esimerkkikohde 2 on Tikkakosken eritasoliittymä, joka sijaitsee Tikka-Mannilan pohjavesialueella. Kohde valittiin esimerkkikohteeksi, jotta päästiin mallintamaan usean rummun ja ojan muodostamaa kokonaisuutta virtausmallilla.

Pohjaveden luiskasuojauksessa haitta-ainepitoisten hulevesien virtaus pohjaveteen esitetään tiivistyskerroksella, joka koostuu bentoniittimatosta ja sen päälle asennettavasta

muovikalvosta. Tiivistyskerroksen päälle rakennetaan suoja- ja kuivatuskerros esimerkiksi hiekasta, pintakerros esimerkiksi silttimoreenista sekä pintaverhoilu (esimerkiksi nurmetus). Pohjaveden suojausalueilla tulee hulevesien johtamiseen kiinnittää erityistä huomiota. Haitta-ainepitoiset hulevedet eivät saa tulla alueille, jossa pohjaveden suojausrakennetta ei ole. (Sikiö 2019)

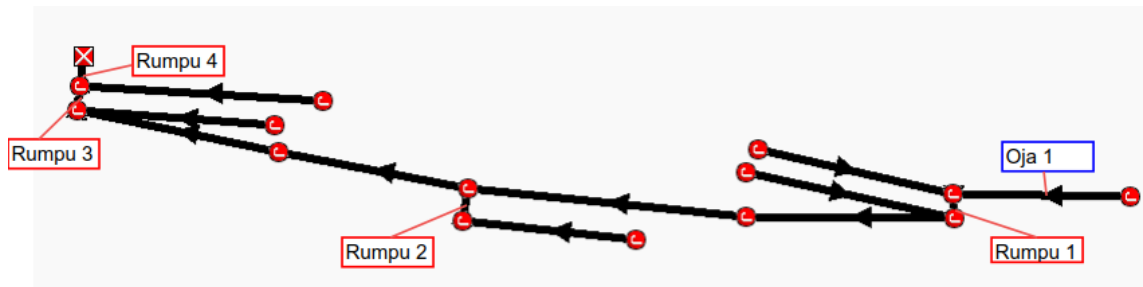
Esimerkkikohteen 2 mallinnus rajattiin meluvallin alittavan rummun valuma-alueeseen (kuva 27). Rummun kautta kulkee karkeasti arvioituna noin puolet koko eritasoliittymän hulevedestä. Tien sivu- ja keskiojat sekä rummut keräävät liittymäalueen kuivatusvedet ja ne johdetaan lopulta meluvallin ali laskuojaan, jota pitkin vedet johdetaan lopulta pohjavedensuojausalueen ulkopuolelle. Rummun kautta johdetaan myös liittymäalueen ulkopuolella sijaitsevalta metsäalueelta valuvaa pintavaluntaa.



**Kuva 27.** Ote eritasoliittymän (esimerkkikohde 2) suunnitelmakartasta. Vaaleanpunaishalla on merkitty meluvallin alittavan rummun (ympyröity punaisella) valuma-alue. Vaaleanvihreällä on esitetty alueet, joihin pohjaveden luiskasuojausrakenne on suunniteltu ja sinisillä nuolilla kuivatusvesien kulkusuunta.

Valuma-alue jaoteltiin osa-valuma-alueisiin vastaavasti kuin esimerkkikohteessa 1. Asfalttialueet, sisäluiskat, ulkoluiskat ja muut maa-alueet eroteltiin omiksi osavaluma-alueikseen. Yhtensä malliin muodostettiin 30 osavaluma-aluetta. Koko rajatun valuma-alueen pinta-ala on noin 3,3 hehtaaria.

Virtausmalli koostui 14 solmupisteestä ja niiden väliin määritetyistä neljästä rummusta sekä kymmenestä ojasta (kuva 28). Kaikkien mallinnettujen rumpujen halkaisijat ovat tiesuunnitelman mukaan 400 mm. Ojien ja rumpujen korkotiedot, sekä ojien poikkileikkaukset saatiin tiesuunnitelma-aineistosta. Yhtä keskiojaa lukuun ottamatta ojat olivat sivuojia ja niiden syvyydeksi määritettiin 1 metri (keskioja 0,8 m).



**Kuva 28.** Esimerkkikohteen 2 virtausmalli. Punaiset pisteet ovat solmupisteitä ja mustat nuolet oja ja rumpuja. Rumpun 4 päätepiste on virtausmallin purkupiste (rasti ja neliö)

### 4.2.3 Valuma-alueiden määrittäminen ja mallin rakentaminen

Esimerkkikohteiden 1 ja 2 rajaamiseksi tarkasteltiin ensin karkealla tasolla lentokentän varalaskupaikan ja eritasoliittymän kuivatusjärjestelmiä ja olemassa olevia uomia sekä niiden valuma-alueita. Tämän jälkeen esimerkkikohteiden osavaluma-alueet määritettiin piirtämällä ne Autodeskin Civil 3D-ohjelmaan.

Lähtöaineistona käytettiin tiesuunnitelman aineistoa ja Maanmittauslaitoksen avoimesti saatavilla olevaa aineistoa. Määrittelyssä hyödynnettiin muun muassa seuraavia aineistoja: suunnitellun väylärakenteen ja ojien korkeustiedot esimerkiksi korkeuskäyrien muodossa suunnitteluohjelmasta (Tekla Civil), rumpujen sijaintitiedot tiesuunnitelma-aineiston rumpuluettelosta, maaston korkeustiedot pohjakartan korkeuskäyrästä ja tiesuunnitelman maastomallista, maanpeitetiedot ilmakuvasta sekä nykyisten ojien ja uomien sijainti pohjakartasta.

Valuma-alueiden määrittämisessä kokeiltiin myös muita menetelmiä ja lähtöaineistoja, sillä osavaluma-alueiden piirtäminen edellä kuvatusti on työlästä, varsinkin jos halutaan määrittää tarkasti pieniä valuma-alueita. Maaston korkeustietojen lähtöaineistona kokeiltiin tiesuunnitelman maastomallin lisäksi Maanmittauslaitoksen esikäsitlemätöntä laserkeilausaineistoa. Kokeilun tavoitteena oli, että laserkeilausaineistosta muodostettaisiin Civil 3D-ohjelmaan maanpinnan pintamalli ja osavaluma-alueiden määrittämisessä hyödynnettäisiin Civil 3D-ohjelmiston catchment-työkalua. Kokeilujen perusteella todettiin, että laserkeilausaineiston ja catchment-työkalun käyttö mallinnuksessa ei ole mahdollista tämän työn yhteydessä, koska aineiston ja työkalun käyttö olisi vaatinut enemmän aikaa. Catchment-työkalun käyttö edellyttäisi, että maanpinnan laserkeilausaineisto, väylän pintamalli ja kuivatusjärjestelmän tiedot on yhdistetty ehjäksi yhdistelmämalliksi. Käytännön ongelmiin törmättiin jo esikäsitlemättömän laserkeilausaineiston kohdalla, joka oli aineistokooltaan niin suuri, että Civil 3D-ohjelma ei pystynyt sitä käsittelemään.



Valuma-alueiden alustavissa tarkasteluissa hyödynnettiin myös Suomen Metsäkeskuksen julkaisemaa ”Valuma-alueen määrittäminen” karttapalvelua, jossa on tausta-aineistona mm. Maanmittauslaitoksen 2 m korkeusmalli ja siitä johdetut virtausverkot. Karttapalvelussa esitetyt virtausverkot ovat suuntaa-antavia eivätkä välttämättä osu kartalla oleviin uomiin, sillä maanpintamallissa ei ole erikseen huomioitu olemassa olevia vesiuomia. Myöskään tien alittavia siltoja tai rumpuja ei ole huomioitu lukuun ottamatta suuria teitä, joten teiden lähellä sijaitsevat virtausreitit eivät ole välttämättä oikein (Jämsén 2019).

Osavaluma-alueet tuotiin SSA-ohjelmaan LandXML-tiedostona. Sen jälkeen malliin määritettiin solmupisteet, eli rumpujen ja ojien alku- ja loppupisteet ja niiden välille linkit, eli rummut tai avo-ojat. SWMM-menetelmässä myös valuma-alueet linkitettiin toisiinsa, jos joltain valuma-alueelta pintavalunta siirtyi selvästi seuraavalle valuma-alueelle (esimerkiksi ajoradalta pintavalunta siirtyy sisäluiskaan).

Seuraavaksi kunkin valuma-alueen, solmupisteen ja linkin tiedot syötettiin malliin. Syötettävät tiedot riippuivat siitä, kumpaa valunnan mallinnusmenetelmää käytettiin ja mitä laskennallisia menetelmiä siinä hyödynnettiin.

#### 4.2.4 Mitoitussateet

Esimerkkikohteissa hulevesien mallinnukseen käytettävät mitoitussateet valittiin ohjeen Teiden ja ratojen kuivatus mukaisesti. Lisäksi testattiin vaihtuvan intensiteetin sateita SWMM-menetelmällä.

Väyläviraston ohjeistuksen (Liikennevirasto 2013a) mukaan molempien esimerkkikohteiden valuma-alueiden rummut ja ojat voitaisiin mitoittaa kokemuseräisesti, koska valuma-alueet ovat pinta-alaltaan alle 5 hehtaaria. Ohjeen mukaan rummun koko on tarkastettava kuitenkin aina valuma-alueen mitoitusvirtaaman perusteella. Rummun mitoitusperusteeksi valittiin rankkasade, koska valuma-alueet ovat alle 10 hehtaaria.

Mitoitussateen toistuvuudeksi valittiin kerran sadassa vuodessa toistuva sade, koska kyseessä on moottoritie. Esimerkkikohteessa 1 mitoitussateen kestoksi valittiin 5 minuuttia valuma-alueen koon perusteella. Mitoitussateen intensiteetiksi saadaan näin 420 (l/s)/ha, joka on 151,2 mm/h (2,52 mm/min). Esimerkkikohteessa 2 valuma-alueen ollessa noin 3 hehtaaria mitoitussateen kestoajaksi valittiin 10 minuuttia ja sateen intensiteetiksi 300 (l/s)/ha eli 108 mm/h (1,8 mm/min).

Rationaalista menetelmä käytettäessä mitoitussateen intensiteetti voidaan syöttää suoraan SSA-ohjelmaan, mutta SWMM-menetelmää käytettäessä sade tuotiin ulkoisena tiedostona. Ulkoinen tiedosto on dat-muotoinen tiedosto, jossa tulee olla seuraavat tiedot:

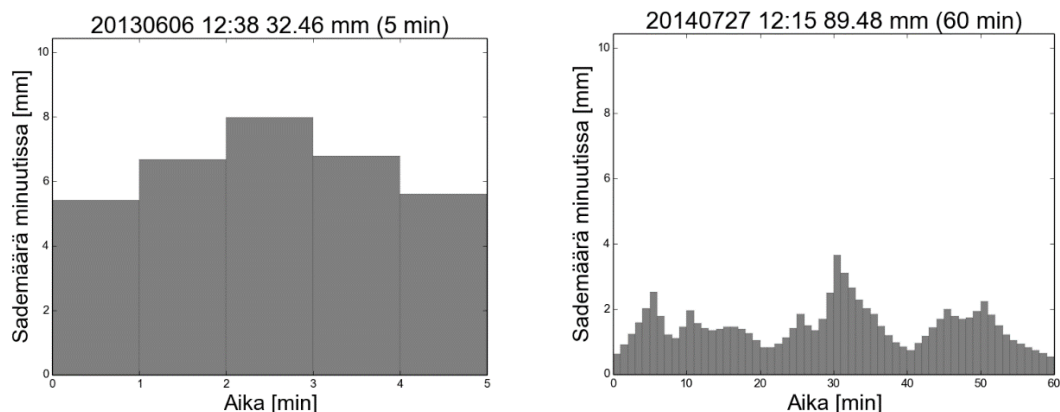


mittausaseman nimi, vuosi, kuukausi, päivä, tunti, minuutti sekä sademäärä [mm/h] (kuva 29).

ohje	2018	6	6	12	60	151.20
ohje	2018	6	6	13	1	151.20
ohje	2018	6	6	13	2	151.20
ohje	2018	6	6	13	3	151.20
ohje	2018	6	6	13	4	151.20

**Kuva 29.** 5 minuutin mitoitussade SSA-ohjelmaan syötettävässä dat-muodossa

SWMM-menetelmällä testattiin myös vaihtuvan intensiteetin sateita, sillä ne kuvaavat sadetapahtumaa todenmukaisemmin, kuin tasaisen intensiteetin mitoitussateet. Mitoitussateiden muotokirjastosta (Ilmatieteen laitos 2017b) valittiin kaksi satunnaista mitattua sadetta, joiden toistuvuus oli 100 vuotta (kuva 30). Sateiden kestoajat olivat 5 minuuttia ja 60 minuuttia. 5 minuutin sateen keskimääräinen intensiteetti on 270 mm/h ja 60 minuutin 89 mm/h. Keskimääräiseltä intensiteetiltään 5 minuutin vaihtuvaintensiteetinen sade on siis suurempi, kuin Väyläviraston ohjeistuksen mukainen 5 minuutin mitoitussade ja 60 minuutin sade pienempi. Sateet tuotiin SSA-ohjelmaan ulkoisina tiedostoina.



**Kuva 30.** 5 minuutin ja 60 minuutin sateiden hyetografit eli sateen intensiteetin vaihtelu ajan mukaan (Ilmatieteen laitos 2017b)

#### 4.2.5 Valuntamallin laskentamenetelmät ja parametrit

Valuntamallin mallinnusmenetelmänä käytettiin SWMM-menetelmää ja esimerkkikohteessa 1 myös rationaalista menetelmää. Rationaalista menetelmää ei käytetty esimerkkikohteessa 2, sillä se ei sovellu käytettäväksi mallissa, jossa valuma-alueelta vesi valuu toiselle valuma-alueelle. Molemmissa esimerkkikohteissa käytettiin samoja laskentapa-

rametrien arvoja saman tyyppisillä valuma-alueilla (taulukko 10). Rationaalisessa menetelmässä käytettiin Väyläviraston ohjeistuksen (Liikennevirasto 2013a) mukaisia valumakertoimia. Painannesäilynnän arvot ja Manningin karkeuskertoimen arvot valittiin SSA-ohjelman valintataulukoista. Taulukkoarvot perustuvat amerikkalaiseen kirjallisuuteen, esimerkiksi ASCE:n julkaisuun Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems. Painannesäilyntää arvioitiin esiintyvän puolella asfaltoidusta alueesta.

**Taulukko 10.** Valuntamallissa käytetyt laskentaparametrien arvot

Osavaluma-alue	Kaltevuus [%]	Rationaalinen menetelmä	SWMM		
		Valumakerroin [-]	Painannesäilyntä [%]	Painannesäilyntä [mm]	Manningin karkeuskerroin [-]
Asfaltti	3	0,8	50	1,25	0,01
Sisäluiska	25	0,5	100	3,5	0,4
Meluvalli/ ulkoluiska	50	0,5	100	3,5	0,4
Metsä	3	-	100	7,5	0,6

Viipymä määritettiin rationaalista menetelmää käytettäessä kahdella eri tavalla: mitoitusasteen kestoajan mukaiseksi, sekä laskennallisesti FAA-menetelmällä (kaava 4). FAA-menetelmä valittiin, koska se sopii käytettäväksi rationaalisen menetelmän kanssa pienillä valuma-alueilla, jossa pintavalunta ei kanavoidu (Salimi et al. 2015). FAA-menetelmän käyttöä puoltaa myös se, että esimerkkitapahtuman 1 valuma-alue vastaa olosuhteiltaan hyvin paljon lentokenttää, joiden kuivatuksen suunnittelua varten FAA-menetelmä on kehitetty. Viipymän määrittäminen mitoitusasteen kestoajan mukaiseksi perustuu Väyläviraston ohjeistuksen (Liikennevirasto 2013a) mukaiseen taulukkoon 4, jossa mitoitusasteen kesto valitaan valuma-alueen koon mukaan. Taulukossa on siis otettu karkeasti huomioon se, että pienillä valuma-alueilla on lyhyempi viipymä, kuin suurilla ja siten myös mitoitusaste on lyhyempi.

Valuntamallissa ei huomioitu haihtumista. SWMM:ssä käytettiin imeytymisen mallintamiseen Green Ampt-menetelmää ja maaperän oletettiin olevan hiekkaista silttiä. Imeytymisen arvoina käytettiin ohjelman taulukon mukaisia arvoja, jotka olivat:

- Kapillaarinen nousukorkeus: 110 mm
- Vedenläpäisevyys: 11 mm/h (eli  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s)
- Maan vesipitoisuus alkutilanteessa 26,3 %.

#### 4.2.6 Virtausmallin laskentamenetelmät ja -parametrit

Valuntamallilla SWMM-menetelmällä laskettu osavaluma-alueilta purkautuva virtaama johdettiin virtausmalliin, eli solmupisteisiin ja linkkeihin. Rationaalisella menetelmällä tuotettua valuntakäyrän approksimaatiota ei hyödynnetty virtausmallissa, sillä useiden kirjallisuuslähteiden perusteella rationaalinen menetelmä soveltuu lähinnä huippuvirtaamien arviointiin (Government of Western Australia 2019; NJDEP 2004).

Esimerkkikohteiden virtauslaskentaan käytettiin dynaamista aaltoyhtälöä, sillä se on laskennallisesti monipuolisin ja tarkin SSA-ohjelmistossa käytettävissä olevista vaihtoehdoista ja lisäksi se soveltuu lyhyisiin mallinnuksiin. Menetelmän etuna on muun muassa mahdollisuus linkkien nielu- ja purkautumishäviöiden sekä paineellisen virtauksen mallintamiseen. SWMM- menetelmässä hydrologisen ja hydraulisen laskennan aika-askeleeksi valittiin 10 sekuntia.

Ojan ja rummun Manningin karkeuskertoimeksi valittiin Väyläviraston ohjeistuksen (Liikennevirasto 2013a) mukaiset arvot. Ojissa ei huomioitu nielu- ja purkautumishäviöitä, sillä ohjelman käyttöoppaan mukaan avouomaan kanavoituneeseen virtaukseen ei tule huomioida häviöitä. Rummun nieluhäviöksi valittiin rummun pystysuoran suuaukon mukainen häviökerroin SSA-ohjelman taulukkoarvojen perusteella. Taulukkoarvot perustuvat FHWA:n oppaaseen Hydraulic Design of Highway Culverts. Ohjelman käyttöoppaan (Autodesk® 2017) mukaan rummun purkautumishäviönä voidaan käyttää arvoa 0, kun osittain täyttä oleva rumpu purkautuu samaan suuntaan virtaavan uomaan. Mikäli veden virtausnopeus putoaa lähes nolnaan rummun purkautuessa esimerkiksi viivytysaltaaseen tai isoon jokeen, käytetään purkautumishäviökerrointa 1. Rummuille, jotka purkautuvat kohtisuoraan purkuojiin nähden arvioitiin purkautumishäviökertoimen olevan 0,5.

**Taulukko 11.** Virtausmallissa käytetyt laskentaparametrien arvot

Linkki	Manningin karkeuskerroin [-]	Nieluhäviökerroin [-]	Purkautumishäviökerroin [-]
Oja	0,07	0	0
Rumpu	0,015	0,2	0 tai 0,5

## 5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä kappaleessa esitetään tutkimuksen tulokset ja niiden tarkastelu. Ensin luvussa vertaillaan rationaalisella menetelmällä ja SWMM menetelmällä laskettuja valuntamallin tuloksia. Tämän jälkeen esitetään tulokset siitä, voidaanko kuivatusrakenteiden mitoitus toteuttaa mallinnusohjelmalla Väyläviraston ohjeistuksen mukaisesti tai niihin perustuen. Lisäksi luvussa esitetään esimerkkien avulla SWMM-menetelmän ja mallinnuksen etuja kuivatussuunnittelussa. Lisäksi luvussa käsitellään mallinnusohjelman käyttöä ja mallinnustuloksiin vaikuttavia tekijöitä.

### 5.1 Rationaalisen menetelmän ja SWMM-menetelmän valuntamallin tulosten vertailu

Rationaalista menetelmää ja SWMM-menetelmää vertailtiin työssä esimerkkitapahtuman 1 valuntamallin tulosten perusteella. Menetelmien vertailussa tarkasteltiin eroja osavaluma-alueiden sekä koko valuma-alueen valuntakäyrissä, huippuvirtaamissa sekä valuntamäärissä. Rationaalisen menetelmän käytössä vertailtiin myös kahta erilaista tapaa viipymän määrittämiseen.

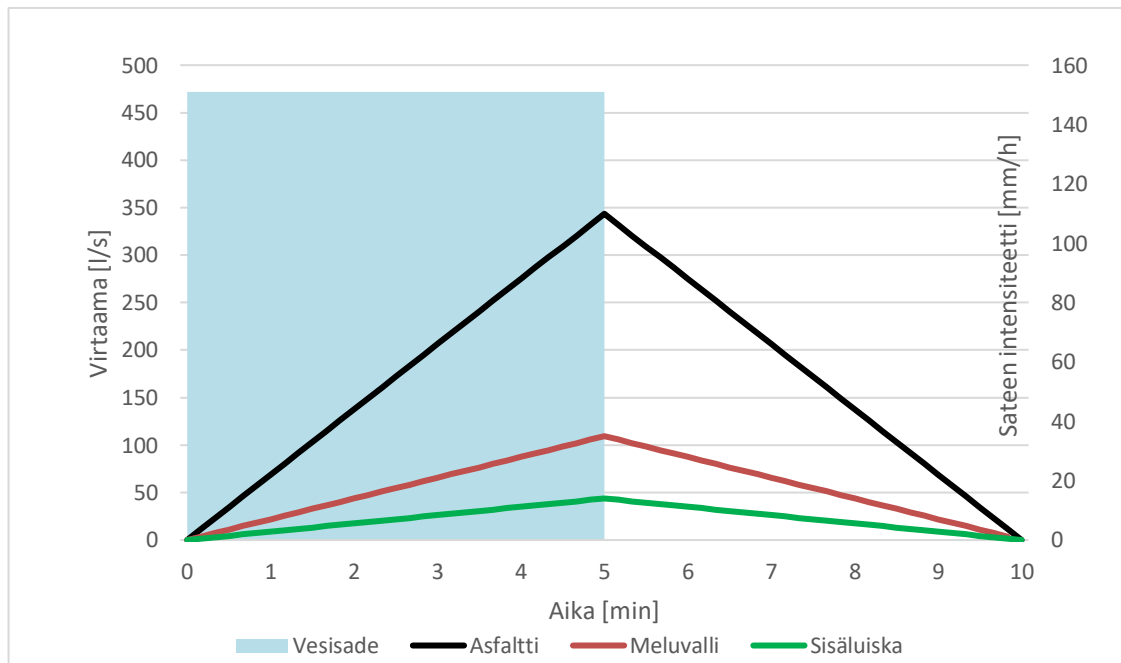
Valuntakäyrä kuvaa valuma-alueelta purkautuvaa virtaamaa ajan suhteen. Valuntakäyrän suurin arvo on huippuvirtaama eli suurin hetkellinen virtaama valuma-alueen purkupisteessä. Valuntamäärä on valuntakäyrän alle jäävä pinta-ala.

Väyläviraston Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu -ohjeen mukaan alle 10 hehtaarin valuma-alueilla mitoitusvirtaaman laskentaan käytetään rankkasateeseen perustuvaa rationaalista menetelmää, jolla huippuvirtaama määritetään sateen intensiteetin ja valumakertoimen perusteella. Sateen intensiteetti määritetään Väyläviraston ohjeistuksen mukaan sateen keston ja toistuvuuden perusteella. Sateen kesto valitaan ohjeen mukaan valuma-alueen koon perusteella ja esimerkkitapahtumassa 1 käytettiin siten viiden minuutin kestoista mitoitussadetta.

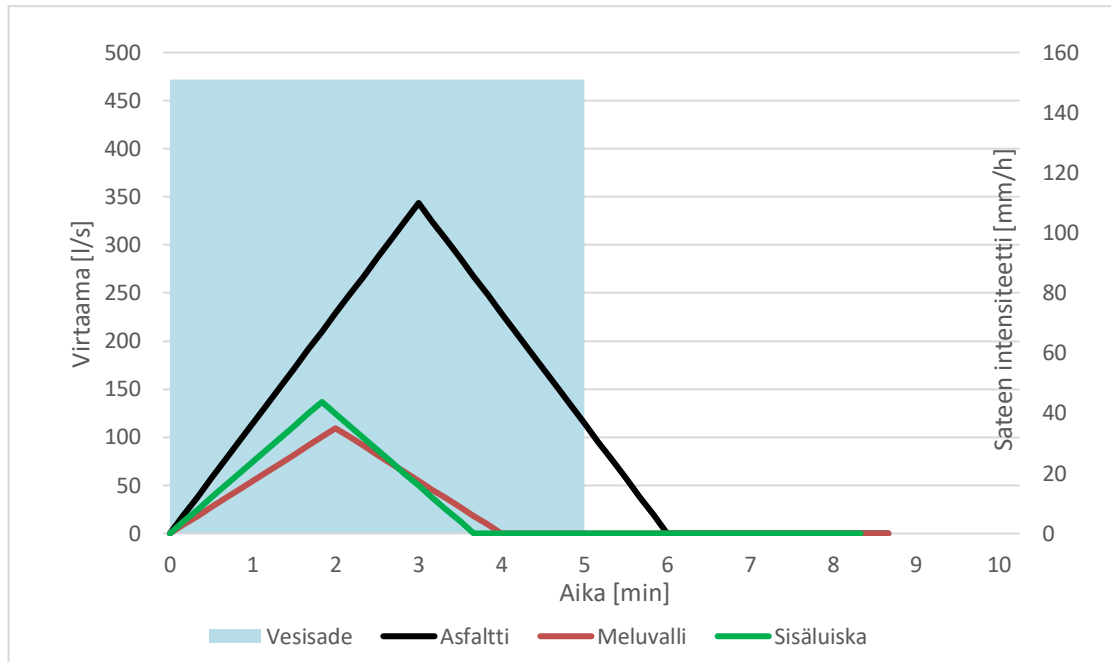
SSA-ohjelmalla rationaalisesta menetelmästä käytettäessä pystytään käyttämään useita eri viipymän laskentamenetelmiä, kuten Kirpichin menetelmää (kaava 3) ja FAA-menetelmää (kaava 4) tai määrittelemään viipymä itse. Viipymä vaikuttaa rationaalisen menetelmän avulla muodostetun valuntakäyrän muotoon, sillä käyrän huippupiste (huippuvirtaama) saavutetaan viipymän mukaisessa ajassa. Työssä vertailtiin valuntakäyriä, jotka

perustuvat FAA-menetelmällä laskettuun viipymään ja Väyläviraston ohjeistuksen mukaisen mitoitussateen kestoiseen viipymään (5 min). FFA-kaavaan tarvitaan lähtötietona valuma-alueen kaltevuus ja virtausreitin pituus.

Kun viipymän oletettiin olevan kaikilla osavaluma-alueilla sama, kuin mitoitussateen keston (5min), huippuvirtaama saavutettiin sateen lopussa (kuva 31). Kun taas viipymän laskentaan käytettiin FAA-menetelmää, eri osavaluma-alueet saavuttivat eri aikaan huippuvirtaaman (kuva 32). Esimerkiksi meluvalli ja sisäluiska saavuttavat huippuvirtaaman nopeammin kuin asfalttialue, koska niissä pisin virtausmatka on lyhyempi ja kaltevuus jyrkempi, joten vesi valuu nopeammin purkupisteeseen eli ojan alkupisteeseen. FAA-kaavalla lasketut viipymät olivat lyhyempiä, kuin mitoitussateen kesto, mikä johti siihen, että valunta meluvallissa ja sisäluiskassa loppui jo ennen mitoitussateen kesto.

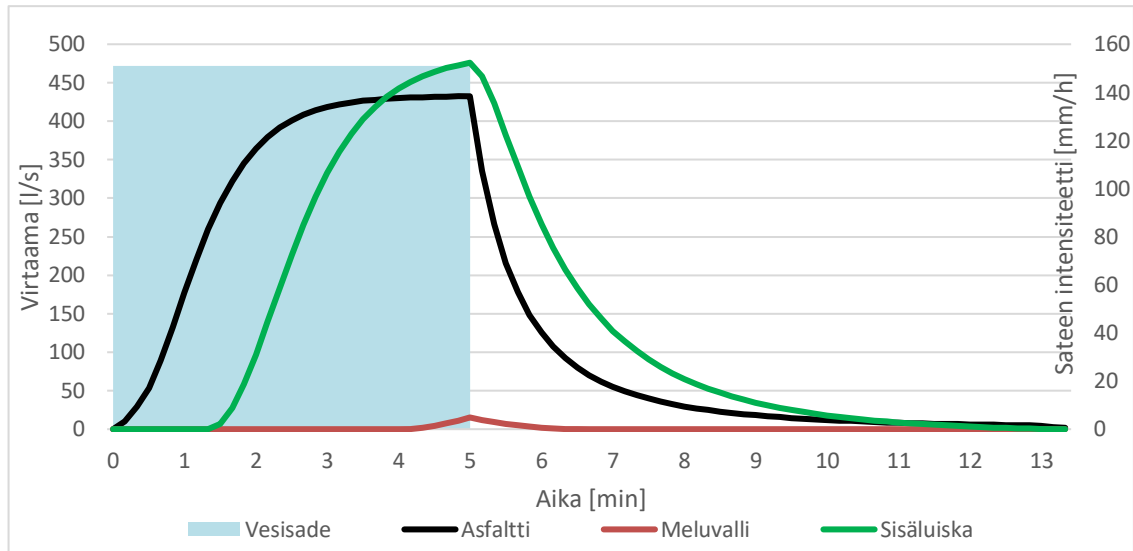


**Kuva 31.** Rationaalisella menetelmällä tuotetut valuntakäyrät osavaluma-alueittain, kun viipymä = mitoitussateen kesto



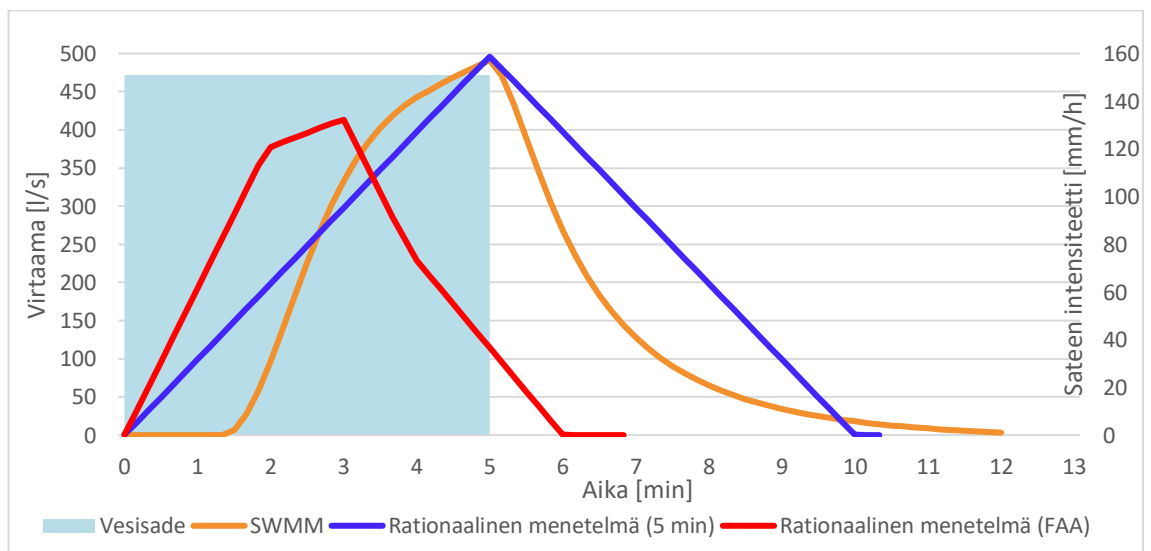
**Kuva 32.** Rationaalisella menetelmällä tuotetut valuntakäyrät osavaluma-alueittain, kun viipymä laskettu FAA-menetelmällä

SWMM-menetelmässä kunkin osavaluma-alueen huippuvirtaama saavutettiin mitoitus-sateen lopussa (kuva 33). Valumakäyrien muotoon vaikuttavat esimerkiksi osavaluma-alueiden imeytyminen ja painannesäilyntä. Valuntaa alkaa muodostua vasta, kun osavaluma-alueen vedenvarastointikyky on ylittynyt. Tämä on nähtävissä esimerkiksi meluvallin valuntakäyrässä, jossa valunta alkaa vasta, kun sadetta on kestänyt noin neljä minuuttia. Sateen päätyttyä hulevesi purkautuu valuma-alueelta ja painanteisiin varastoitunut vesi tyhjenee. SWMM-menetelmässä sisäluiskan valuntakäyrä on suurin, sillä asfalttialueen hulevedet kulkeutuvat sisäluiskaan ja malli on rakennettu linkittämällä asfalttialueen osa-valuma-alue sisäluiskaan.



**Kuva 33.** SWMM-menetelmällä tuotetut valuntakäyrät osavaluma-alueittain

Valuntamallissa kaikki osavaluma-alueilta purkautunut virtaama johdettiin ojan alkupisteeseen. Ojan alkupisteessä voidaan siis tarkastella menetelmittäin koko valuma-alueelta purkautuvaa valuntaa (kuva 34). FAA-menetelmällä viipymää laskettaessa valuma-alueen valuntakäyrä ei ole kolmiomainen, koska osavaluma-alueiden huippuvirtaamat tapahtuvat eri aikaan. Mikäli taas oletetaan viipymän olevan sama kaikilla osavaluma-alueilla (rationaalinen menetelmä, jossa viipymä 5 min) huippuvirtaamat tapahtuvat saman aikaisesti ja kasvattavat siten koko valuma-alueen huippuvirtaamaa.



**Kuva 34.** Eri menetelmillä tuotetut valuntakäyrät koko valuma-alueen purkautumispisteessä (ojan alkupiste)

Osavaluma-alueiden ja koko valuma-alueen huippuvirtaamia ja valuntamääriä on vertailtu menetelmittäin taulukoissa 12 ja 13. Tarkasteluun on lisätty myös tilanne, jossa

SWMM-menetelmän valuntamalli muutettiin siten, että asfalttialueen valunta ei linkity sisäluiskaan vaan suoraan ojan alkupisteeseen, jotta pystytään vertailemaan pelkän sisäluiskan valuntaa eri menetelmillä. Asfalttialueelta suurin huippuvirtaama saavutettiin SWMM-menetelmällä, mutta meluvallissa ja sisäluiskassa rationaalisella menetelmällä lasketut huippuvirtaamat ovat suurempia kuin SWMM-menetelmällä lasketut. Rationaalisessa menetelmässä viipymän määrittystapa ei vaikuttanut osavaluma-alueiden huippuvirtaamiin, koska sateen intensiteetti oli valittu viipymästä riippumatta Väyläviraston ohjeistuksen mukaisesti. Suurin huippuvirtaama koko valuma-alueelta on laskettu rationaalisella menetelmällä olettaen, että viipymä on mitoitusateen keston mukainen ja sama kaikilla osavaluma-alueilla.

**Taulukko 12.** *Huippuvirtaamien vertailu eri laskentamenetelmillä osavaluma-alueilla ja koko valuma-alueen purkupisteessä*

Osavaluma-alue	Huippuvirtaama [l/s]		
	SWMM	Rationaalinen menetelmä	
		Viipymä = 5 min	Laskettu viipymä
<b>Asfaltti</b>	432,4	343,5	343,5
<b>Sisäluiska, johon linkitetty asfaltti</b>	476,0	-	-
<b>Sisäluiska</b>	9,26	43,7	43,7
<b>Meluvalli</b>	15,2	109,3	109,3
<b>Koko valuma-alue (ojan alkupiste)</b>	489,9	495,8	413,2

Asfalttialueelta purkautui suurin määrä hulevettä SWMM-menetelmällä laskettuna. SWMM-menetelmällä lasketut valuntamäärät meluvallista ja sisäluiskasta ovat kuitenkin pienemmät, kuin rationaalisella menetelmällä lasketut. Kun asfalttialue on linkitetty sisäluiskaan, huleveden kokonaismäärä vähenee verrattuna suoraan ojan alkupisteeseen johdettuun tilanteeseen (jossa valuntamäärä = 124,8 m<sup>3</sup>), koska asfalttialueen hulevesi imeytyy sisäluiskaan. Rationaalisesta menetelmästä viipymän määrittystapa vaikuttaa merkittävästi huleveden määrään. Kun oletetaan viipymän olevan mitoitusateen keston mukainen, saavutetaan koko valuma-alueelta suurin valuntamäärä. Mikäli viipymä lasketaan FAA-menetelmää käyttäen, saavutetaan pienempi valuntamäärä kuin SWMM-menetelmällä.



**Taulukko 13.** Valuntamäärien vertailu eri laskentamenetelmillä osavaluma-alueilla ja koko valuma-alueen purkupisteessä

Osavaluma-alue	Valuntamäärä [m <sup>3</sup> ]		
	SWMM	Rationaalinen menetelmä	
		Viipymä = 5 min	Laskettu viipymä
<b>Asfaltti</b>	123,5	103,1	61,8
<b>Sisäluiska, johon linkitetty asfaltti</b>	111,6	-	-
<b>Sisäluiska</b>	0,5	13,12	4,8
<b>Meluvalli</b>	0,8	32,8	13,12
<b>Koko valuma-alue (ojan alkupiste)</b>	112,4	149,0	79,8

SSA-ohjelmalla saadaan tuotettua rationaalista menetelmää käyttäen valuntakäyrä, mutta valuntakäyrän soveltamisessa tulee huomioida rationaalisen menetelmän oletukset ja rajoitukset. Valuntakäyrää käytetään esimerkiksi syöteenä virtausmalliin ja huleveden määrän arviointiin.

Rationaalisen menetelmän laskukaavassa ei pystytä huomioimaan sateen kestoa muuten kuin sateen intensiteetin määrittämisessä. Viipymän ollessa lyhyempi, kuin mitoitusasteen kesto, valuntakäyrä ei kuvaa sadanta-valuntatapahtumaa, sillä valunta voi loppua tällöin jo ennen mitoitusasteen loppumista. FAA-menetelmällä lasketulla valuntakäyrällä (kuva 32) valuntatapahtuma meluvallissa ja sisäluiskassa oli ohi jo neljässä minuutissa, vaikka mitoitusasteen kesto on 5 minuuttia. FAA-menetelmällä muodostetulla valuntakäyrällä ei voida tällöin arvioida huleveden määrää.

Jos oletetaan, että viipymä on sama kuin koko mitoitusasteen kesto, saavutetaan huippuvirtaama mitoitusasteen lopussa (kuva 31) ja näin sateen kesto saadaan myös huomioitua. Tällöin voi olla mahdollista käyttää valuntakäyrää myös huleveden määrän arviointiin. Rationaalisen menetelmän valuntakäyrän soveltamisessa tulee kuitenkin huomioida kaikki rationaalisen menetelmän rajoitukset ja oletukset, kuten se, että käyrä muodostetaan vain yhden lasketun pisteen ( $C_iA$ =huippuvirtaama=viipymä) perusteella.

Tutkittujen kirjallisuuslähteiden (Badea et al. 2002; Government of Western Australia 2019; NJDEP 2004; Pennington et al. 2012) ja tulosten perusteella rationaalisella menetelmällä tuotetun valuntakäyrän käyttöön virtausmallissa tulisi suhtautua varauksella. Tässä työssä ei testattu rationaalisella menetelmällä tuotettua virtauskäyrää virtausmal-

lissa. SSA-ohjelman käyttöoppaassa todetaan, että menetelmää ei tulisi käyttää huleveden määrään perustuvassa suunnittelussa (Autodesk® 2017). Modifioitu rationaalinen menetelmä voisi soveltua paremmin valuntamäärien arviointiin, mutta tässä työssä sitä ei testattu.

Rationaalisella menetelmällä ja SWMM-menetelmällä käytettiin samaa sateen intensiteettiä ja osavaluma-alueiden pinta-aloja. Muilta osin menetelmät eroavat hyvin paljon laskennallisesti, sekä valuma-alueita kuvaavien laskentaparametrien osalta. SWMM-menetelmässä on paljon syötettäviä parametrien arvoja, joiden avulla voidaan kuvata tarkemmin valuma-alueiden ominaisuuksia, kuin rationaalisen menetelmän valumakerrotoimella. Rationaalisessa menetelmässä valumakerroin pysyy myös vakiona sateen intensiteetistä ja kestosta riippumatta, kun taas SWMM:ssä valuntaominaisuudet vaihtelevat sateen aikana. Huippuvirtaamat koko valuma-alueelta ovat samaa suuruusluokkaa SWMM-menetelmällä ja rationaalisella menetelmällä, kun viipymä on mitoitussateen keston mukainen.

## **5.2 Väyläviraston ohjeistuksen mukainen kuivatusjärjestelmän mitoitus**

Yhtenä työn tavoitteena oli tutkia, voidaanko Väyläviraston ohjeistuksen mukainen mitoitus tehdä mallinnusohjelmalla.

Väyläviraston ohjeistuksen mukaisesti molempien esimerkkikohteiden rummut, sivuojat sekä keski- ja välialueojat voidaan mitoittaa kokemusperäisesti, sillä valuma-alueet ovat alle 5 hehtaaria. Tiesuunnitelmassa kaikki esimerkkikohteiden rummut oli esitetty halkaisijalla 400 mm. Rumpukoot tulee kuitenkin ohjeen mukaan tarkastaa myös mitoitusvirtaamalla, joka valuma-alueen koosta johtuen lasketaan rationaalisella menetelmällä. Väyläviraston ohjeistuksessa rummun hydraulinen mitoitus perustuu mitoituspadotukseen (taulukko 8), joka lasketaan Seunan k-menetelmään perustuvalla kaavalla 6.

Esimerkkikohteessa 1 kaavan 6 lähtötiedoksi tarvittava mitoitusvirtaama eli rummun valuma-alueelta syntyvä huippuvirtaama voidaan laskea mallinnusohjelman valuntamallilla rationaalista menetelmää käyttäen, kuten kohdassa 5.1 tehtiin. Rumpua ei voida kuitenkaan mitoittaa mallintamalla täysin Väyläviraston ohjeistuksen mukaisesti, sillä SSA-ohjelmassa käytettävät rummun hydrauliset laskentamenetelmät eivät ole samat kuin kaavassa 6, vaan perustuvat FWHA:n ohjeistuksen (Schall et al. 2012) mukaisiin laskentamenetelmiin.

Esimerkkikohteessa 2 rummut, ojat ja niiden valuma-alueet muodostavat monimutkaisen kokonaisuuden, jossa viimeisen rummun tulee johtaa kaikki muodostunut hulevesi pois

liittymäalueelta. Rationaalisella menetelmällä laskettaessa ei pystytä linkittämään valuma-alueita toisiinsa ja eikä menetelmällä tuotettua valuntakäyrää kannata käyttää monimutkaiseen virtausmallinnukseen, sillä se sisältää niin vähän laskettua informaatiota. Rationaalisien menetelmien käyttö monimutkaisissa järjestelmissä voikin UDFCD:n (2018) mukaan johtaa huippuvirtaaman yliarvioimiseen ja siten kuivatusjärjestelmien ylimitoitukseen.

### **5.3 Väyläviraston ohjeistukseen perustuva kuivatusjärjestelmän mitoitus SWMM-menetelmän valunta- ja virtausmallia käyttäen**

SWMM-menetelmän valuntamallia sekä virtausmallia käyttämällä pystytään tarkastamaan, ovatko 400 mm rummut kapasiteetiltaan riittäviä Väyläviraston ohjeistuksen mukaiselle mitoitussateelle. SWMM-menetelmän etuna rationaalisien menetelmään verrattuna on, että valuma-alueilta muodostunut valuntakäyrä voidaan syöttää virtausmalliin, jossa voidaan hyödyntää dynaamista aaltoyhtälöä. Dynaamisen aaltoyhtälön avulla voidaan muun muassa tutkia paineellista virtausta ja nielu- ja purkautumishäviöitä.

Mallinnuksen avulla vedenkorkeuksia voidaan tarkastella solmupisteissä ja siten selvittää esimerkiksi, paljonko rumpu padottaa ja verrata padotusta sallittuihin mitoituspadoksiin. Mikäli rumpu padottaa paljon, syntyy solmupisteessä tulvimista. Myös mahdollinen ojien tulviminen sekä rumpujen ylikuormittuminen havaitaan mallista laskennan avulla.

Esimerkkikohteessa 1 virtausmalli koostui 0,75 syvästä sivuojasta sekä rummista. Maksimivedenkorkeus kohosi ojan alkupisteessä 0,36 metriin ja rummun alkupisteessä 0,25 metriin. Rumpu ei siis aiheuttanut laisinkaan padotusta. Rummussa oli laskennallista virtauskapasiteettia vielä 547 l/s jäljellä.

Esimerkkikohteessa 2 virtausmalli koostui 14 solmupisteestä, neljästä rummista ja kymmenestä ojasta. Taulukossa 14 on tarkasteltu rumpujen ja yhden sivuojan virtausmallin laskentatuloksia. Huippuvirtaaman ja laskennallisen virtauskapasiteetin suhde sekä veden virtauskorkeuden ja linkin maksimivedenkorkeuden suhde antavat käsityksen siitä, paljonko kussakin linkissä kapasiteettia on jäljellä vai onko se ylitetty. Rumpu 1 ja 3 ovat lähes täynnä ja laskennallista virtauskapasiteettia on rummussa 1 jäljellä alle 1 l/s. Padotusta tai tulvimista ei kuitenkaan esiinny.

**Taulukko 14.** Esimerkkikohteen 2 virtausmallin tuloksia Väyläviraston ohjeistuksen mukaisella mitoitussateella

Laskentatulokset	Oja 1	Rumpu 1	Rumpu 2	Rumpu 3	Rumpu 4
<b>Huippuvirtaama</b>					
<b>Laskennallinen virtauskapasiteetti</b>	0,09	0,99	0,18	0,47	0,37
<b>Veden virtauskorkeus</b>					
<b>Linkin maksimivedenkorkeus</b>	0,33	0,80	0,44	0,85	0,64
<b>Jäljellä oleva laskennallinen virtauskapasiteetti [l/s]</b>	2176,67	0,71	253,33	114,65	167,85
<b>Maksimivedenkorkeus linkin alkupisteessä [m]</b>	0,37	0,39	0,23	0,35	0,34

Väyläviraston ohjeistuksen mukaisilla mitoitussateilla ei syntynyt kummassakaan esimerkkikohteessa ojien tai solmupisteiden tulvimista, rumpujen kapasiteetin ylitystä. Solmujen maksimiveden korkeudet olivat pienemmät kuin rummun halkaisija, joten padotusta ei tapahtunut. Tarkastelun perusteella suunniteltu rumpujen kapasiteetti on riittävä ohjeistuksen mukaisilla mitoitussateilla. Mallintamalla pystyttäisiin myös tutkimaan helposti, sopisivatko pienemmät rumpukoot kohteisiin.

## 5.4 SWMM-menetelmän ja mallinnuksen käytön etuja kuivatussuunnittelussa

SWMM-menetelmää käyttäen saadaan mallinnusohjelmaa hyödynnettyä monipuolisesti. Tässä kappaleessa tarkastellaan esimerkkikohteiden avulla, miten hulevesien mallintamista voitaisiin hyödyntää väylähankkeen kuivatussuunnittelussa. Merkittävä etu mallintamisessa ja SWMM-menetelmän käytössä on mahdollisuus käyttää myös vaihtuvan intensiteetin mitoitussateita. Tässä työssä testattiin 5 minuutin ja 60 minuutin todellisia sadetapahtumia, joissa sateen intensiteetti on mitattu minuutin välein. Etuna mallinnuksessa on myös mahdollisuus tutkia monimutkaisia järjestelmiä ja kokeilla mallin avulla esimerkiksi erilaisia mitoitusvaihtoehtoja. Mallinnusohjelman visuaaliset tarkastelut auttavat mallinnustulosten hahmottamisessa ja esittelyssä.

### 5.4.1 Esimerkkikohteen 1 tarkastelu eri mitoitusvaihtoehdoilla käyttäen vaihtuvaintensiteettisiä sateita

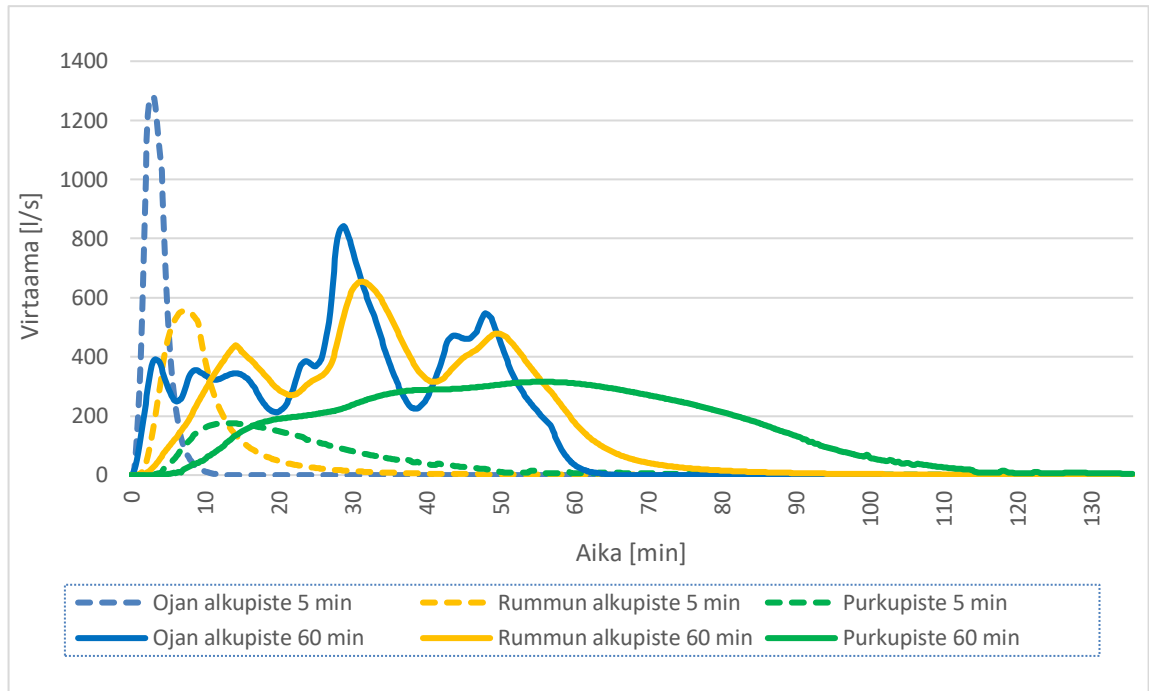
Esimerkkikohdetta 1 tutkittiin molemmilla vaihtuvan intensiteetin sateilla (luku 4.2.4) ja kolmella eri rummun halkaisijalla (400, 500 ja 600 mm) (taulukko 15). Ojan ja rummun alkupisteissä tarkasteltiin maksimivedenkorkeutta sekä solmupisteeseen tullutta huippuvirtaamaa ja huleveden kokonaismäärää. Lisäksi tarkasteltiin rummun laskennallista jäljellä olevaa virtauskapasiteettia sekä rummun läpi kulkenutta huippuvirtaamaa.

Ojan alkupisteessä, johon hulevesi purkautuu osavaluma-alueilta (kuva 35) huippuvirtaamat ovat suuremmat 5 minuutin sateella, kuin 60 minuutin sateella. Samaan solmupisteeseen tullut hulevesimäärä, taas on merkittävästi suurempi 60 minuutin sateella. Ojan alkupisteen laskentatuloksiin rummun koko ei juurikaan vaikuta. 60 minuutin sateella ojan alkupisteen maksimivedenkorkeus tosin kohoaa sentillä rummun koon ollessa 400 mm.

5 minuutin sateella tulvimista ei tapahdu, mutta rummun alkupisteessä esiintyy hieman padotusta, kun rummun halkaisija on 400 mm. 60 minuutin sateella rumpu padottaa jokaisella rumpukoolla. Hulevesi tulvii asfaltille rummun alkupisteessä, kun rumpukoot ovat 400 ja 500 mm. Rummun alkupisteeseen virrannut huleveden kokonaismäärä sekä huippuvirtaama ovat suurempia 60 minuutin sateella. Rummussa saavutetaan suurin huippuvirtaama 60 minuutin sateella rumpukoon ollessa 600 mm.

**Taulukko 15.** Esimerkkikohteen 1 tarkastelu eri kokoisilla rummuilla ja kahdella eri sateella

Tilanne		Ojan alkupiste			Rummun alkupiste			Rumpu	
Sade	Rummun koko [mm]	Maks. veden korkeus [m]	Huippuvirtaama [l/s]	Huleveden määrä [m³]	Maks. veden korkeus [m]	Huippuvirtaama [l/s]	Huleveden määrä [m³]	Jäljellä oleva virtauskapasiteetti [l/s]	Huippuvirtaama [l/s]
5 min	400	0,62	1280	272	0,50	555	312	442	176
	500	0,62	1280	272	0,47	547	309	901	220
	600	0,62	1280	272	0,44	540	307	1578	244
60 min	400	0,47	843	1286	1,07 (tulvii)	654	1329	303	315
	500	0,48	842	1286	0,82 (tulvii)	659	1326	733	388
	600	0,48	843	1286	0,69	663	1312	1377	445



**Kuva 35.** 5 minuutin (katkoviiva) ja 60 minuutin (yhtenäinen viiva) sateiden solmupisteisiin tullut virtaama rummun halkaisijan ollessa 400 mm

Esimerkkikohteissa tulvimisen kannalta ratkaisevaa ei ollut sateen intensiteetti vaan sateen kesto ja valunnan kokonaismäärä. Sateen keskimääräinen intensiteetti ja korkein mitattu intensiteetti oli viiden minuutin sateella huomattavasti korkeampi (ka. 270 mm/h ja maksimi 417 mm/h), kun 60 minuutin sateella (ka. 89 mm/h ja maksimi 219 mm/h). Tulvimista tapahtui kuitenkin vain 60 minuutin sateella, jossa valunnan kokonaismäärä oli huomattavasti suurempi.

Huomioitavaa on, että vaikka rummun alkupiste tulvii 60 minuutin sateella rumpuhalkaisijoilla 400 ja 500 mm, niin rummussa on vielä laskennallista virtauskapasiteettia jäljellä. Jäljellä oleva virtauskapasiteetti lasketaan laskennallisen virtauskapasiteetin ja huippuvirtaaman erotuksena. Laskennallista virtauskapasiteettia ei käytetä mallissa virtauslaskentaan, vaan se kertoo Manningin kaavalla lasketun linkin virtauskapasiteetin avouomavirtauksessa. Huippuvirtaama linkissä voi olla linkissä suurempi tai pienempi, kuin laskennallinen virtauskapasiteetti. Tämä johtuu siitä, että huippuvirtaaman laskentaan käytetään dynaamista aaltoyhtälöä, joka ottaa huomioon muun muassa nielu- ja purkautumishäviöt sekä paineellisen virtauksen.

Huippuvirtaamat pienenevät ojan alkupisteestä rummun alkupisteeseen mentäessä, sillä sivuoja tasoittaa virtaamahuippuja. Rummun alkupisteeseen virrannut huleveden kokonaismäärä on kuitenkin suurempi kuin ojan alkupisteeseen virrannut. Lisäksi rumpukoon

pieneneminen kasvattaa kokonaismäärää solmupisteessä edelleen. Tämä selittyy mahdollisesti sillä, että kaikki vesi ei pääse heti virtaamaan rummista ja järjestelmässä tapahtuu takaisinvirtausta.

#### 5.4.2 Esimerkkikohteen 2 kapasiteetin tarkastelu vaihtuvaintensiteettisillä mitoitusateilla

Esimerkkikohteessa 2 tarkasteltiin kuivatusjärjestelmän kapasiteetin riittävyyttä tiesuunnitelman mukaisilla rumpujen halkaisijoilla 5 minuutin ja 60 minuutin vaihtuvaintensiteettisillä aateilla. Taulukoissa 16 ja 17 on esitetty laskentatulokset vastaavasti kuin Väyläviraston mitoitusateilla (taulukko 14) samoista tarkastelupisteistä.

5 minuutin aateella tarkasteltujen solmupisteiden maksimiveden korkeudet eivät ylitä tulvimiskorkeutta. Rummussa 1 huippuvirtaama on ylittänyt laskennallisen virtauskapasiteetin, mutta rumpu ei ole vielä kokonaan täytynyt vedellä. Rumpu 3 on ylikuormittunut eli rumpu on täynnä vettä ja huippuvirtaama rummussa on suurempi kuin rummun laskennallinen virtauskapasiteetti.

**Taulukko 16.** Esimerkkikohte 2 viiden minuutin vaihtuvaintensiteettisellä aateella

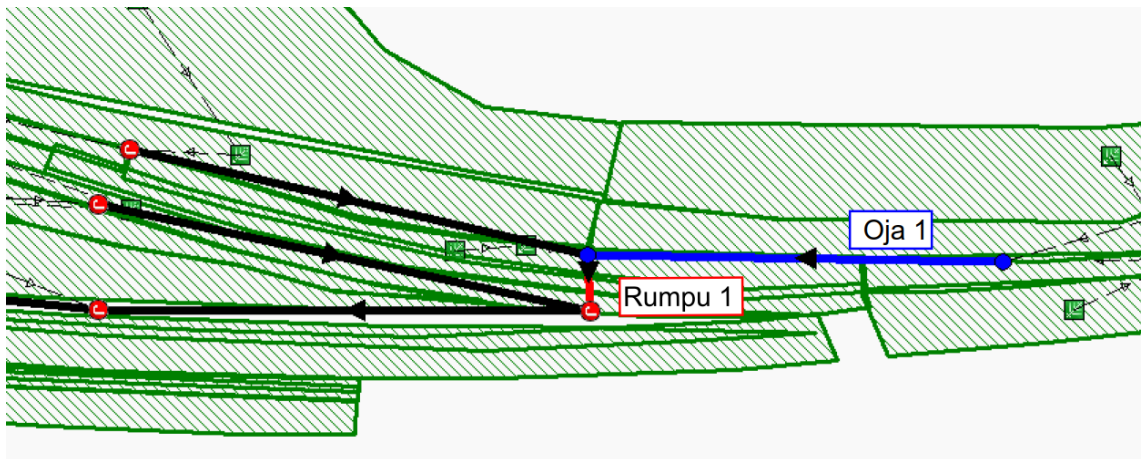
Laskentatulos	Oja 1	Rumpu 1	Rumpu 2	Rumpu 3	Rumpu 4
<b>Huippuvirtaama</b>					
<b>Laskennallinen virtauskapasiteetti</b>	0,47	1,53	0,31	1,08	0,67
<b>Veden virtauskorkeus</b>					
<b>Linkin maksimivedenkorkeus</b>	0,47	0,92	0,6	1,00	0,8
<b>Jäljellä oleva laskennallinen virtauskapasiteetti [l/s]</b>	1893,53	>capacity	212,2	surcharged	87,21
<b>Maksimivedenkorkeus linkin alkupisteessä [m]</b>	0,57	0,57	0,33	0,49	0,53

60 minuutin aateella tarkasteltavan kuivatusjärjestelmän kapasiteetti ei ole riittävä ja tulvimista esiintyy sekä ojissa, että solmupisteissä. Rummuista kolme neljästä on ylikuormittunut ja kyseisten rumpujen alkupisteissä esiintyy tulvimista. Myös oja 1 tulvii, sillä veden virtauskorkeus ylittää jo ojan syvyyden.

**Taulukko 17.** Esimerkkikohde 2 60 minuutin vaihtuvaintensiteetisellä sateella

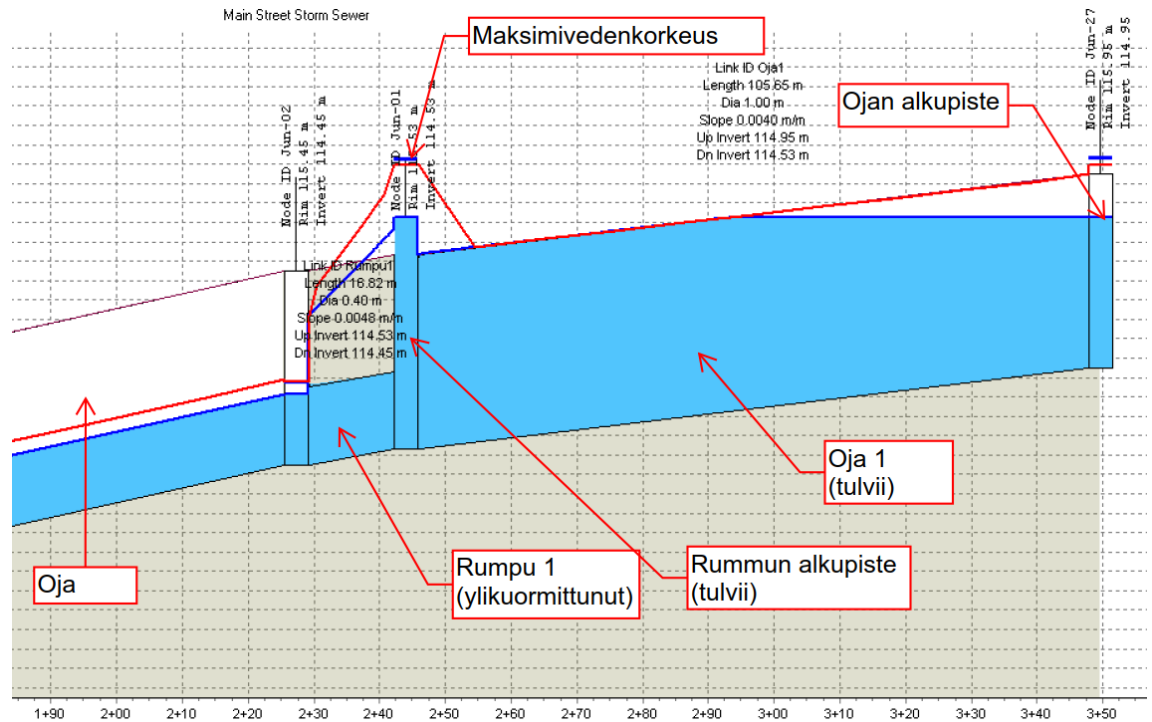
Laskentatulokset	Oja 1	Rumpu 1	Rumpu 2	Rumpu 3	Rumpu 4
<b>Huippuvirtaama</b>					
Laskennallinen virtauskapasiteetti	0,16	3,16	0,42	1,71	2,87
<b>Veden virtauskorkeus</b>					
Linkin maksimivedenkorkeus	1,0	1,0	0,9	1,0	1,0
Jäljellä oleva laskennallinen virtauskapasiteetti [l/s]	flooded	surchar- ged	180,14	surchar- ged	surchar- ged
<b>Maksimivedenkorkeus linkin alkupisteessä [m]</b>	1,09 (tulvii)	1,5 (tulvii)	0,4	1,78 (tulvii)	1,34 (tulvii)

Mallinnusohjelma antaa numeeristen tulosten lisäksi myös visuaalista informaatiota laskennan tuloksista. Ohjelman perusnäkyvästä (kuva 36) nähdään laskennan jälkeen punaisella ja sinisellä värillä tulvineet ja ylikuormittuneet linkit ja solmupisteet. Laskentatuloksia voidaan tutkia myös kuivatusjärjestelmästä muodostetun pituusleikkauksen (kuva 37) avulla. Pituusleikkauksen avulla voidaan tarkastella animaationa, kuinka vesi virtaa järjestelmässä.



**Kuva 36.** Esimerkkikohde 2 60 minuutin sateella. Oja 1, ojan 1 alkupiste sekä rummun 1 alkupiste tulvivat ja rumpu 1 on ylikuormittunut





**Kuva 37.** Esimerkkikohde 2 60 minuutin sateella. Kuvassa meneillään animaatio, jonka avulla nähdään miten vesi virtaa järjestelmässä laskennan aikana. Tumman sinisellä viivalla solmujen maksimivedenkorkeus.

## 5.5 Mallinnusohjelman käyttö

Mallinnusohjelman käyttöä arvioitiin yleisellä tasolla. SSA-ohjelman käyttöopas on kattava ja sen avulla ohjelman käytön opettelu onnistui. Opettelun tueksi myös Autodeskin internet-sivuilta löytyi opetusmateriaalia.

SSA-ohjelmassa pystytään piirtämään valuma-alueet esimerkiksi karttakuvan päälle, mutta ohjelmalla itsellään ei pystytä määrittämään valuma-alueita esimerkiksi maaston muotojen perusteella. Valuma-alueiden määrittäminen on käytännössä tehtävä eri ohjelmilla ennen tuomista SSA-ohjelmaan.

Valuma-alueiden määrittäminen osoittautui hyvin työlääksi, sillä työvaiheessa tarvitaan paljon tietoa eri lähteistä. Valmiiden Civil3D-ohjelmaan piirrettyjen valuma-alueiden tuominen SSA-ohjelmaan onnistui sujuvasti ja se helpotti mallin lähtötietojen syöttämistä, sillä pinta-alaa ei tarvinnut enää erikseen syöttää valuma-alueen tietoihin.

Valuma-alueiden määrittämiseen on käytetty muissa tutkimuksissa erilaisia menetelmiä. Paikkatieto-ohjelmien hyödyntäminen voisi helpottaa määrittäystä erityisesti isoilla alueilla, sillä niillä voidaan tehdä automaattista rajausta valmiin korkeusmallin ja rasteritiedon avulla. Esimerkiksi Aaltonen et al. 2008 ja Kalantari et al. 2012 ovat käyttäneet paikkatieto-ohjelmia valuma-alueiden määrittämisessä.

Lähtötietojen syöttäminen SSA-ohjelmaan käsin on melko työlästä ja siihen vaikuttavat mallinnettavan alueen laajuus ja mallinnustarkkuus. Tässä työssä kuivatusjärjestelmä määritettiin SSA-ohjelmaan käsin syöttämällä kaikkiin solmupisteisiin ja linkkeihin korkeustiedot erikseen. Myös mallinnusparametrit syötettiin käsin ohjelmaan. Lähtötietoja voidaan tuoda SSA-ohjelmaan myös muista ohjelmista. Esimerkiksi kuivatusjärjestelmät on mahdollista tuoda SSA-ohjelmaan LandXML-muodossa, mikä helpottaisi huomattavasti mallin rakentamista. Sadetietojen tuominen ulkoisena dat-tiedostona onnistui hyvin ja vaadittu tiedostomuoto on melko vähäisellä vaivalla tuotettavissa Excel-tiedostosta.

Suurin ongelma ohjelman käytössä oli yllättäen ilmestyneet virheilmoitukset, joita ilmeni erittäin paljon. Virheilmoituksen tultua SSA-tiedostoa ei pystynyt enää tallentamaan, ja ohjelma oli suljettava resurssien hallinnasta pakottamalla. Virheilmoitusten syy jäi epäselväksi eikä ohjelman käyttöoppaasta löytynyt samankaltaista esimerkkiä. SSA-ohjelmassa ei ole toimintoa, jolla pystyy perumaan edellisen toiminnon, joten tallentaminen on tärkeää.

Mallin rakentamisen jälkeen itse laskenta oli nopeaa. Mallinnettavaa tilannetta oli myös helppo muunnella vaihtamalla esimerkiksi mitoitussateita tai rumpukokoja. Laskennan tuloksia pystyttiin tarkastelemaan erittäin monipuolisesti ja visuaaliset esitykset helpottivat tulosten ymmärtämistä. Myös tulosten tuonti Excel- ja dwg-tiedostomuotoihin onnistui.

## 5.6 Mallinnustuloksiin vaikuttavat tekijät

Luotettavien tulosten saamiseksi malli tulisi kalibroida havaintoaineiston perusteella ja validoida testaamalla kalibroituja parametreja toiseen aineistoon (Aaltonen et al. 2008). Suunnittelukohteen ollessa uusi väylä, mallin kalibrointi ei käytännössä ole mahdollista, sillä rakentamisen jälkeistä tilannetta kuvaavia mittaustuloksia ei saada alueelta. Kalibroinnin ongelmaksi muodostuu väylähankkeissa myös mitoituksessa käytetyt harvoin toistuvat sateet, joista voi olla mahdotonta saada riittävästi mittaustuloksia. Tässä työssä ei suoritettu mallin kalibrointia eikä validointia, vaan parametreina käytettiin kirjallisuudesta ja nykyisestä ohjeistuksesta löytyviä arvoja. Työssä saadut mallinnustulokset ovat siis vain suuntaa-antavia. Vastaavasti myöskään Väyläviraston ohjeistuksen mukainen rationaalinen menetelmäkään ei ole luotettava ilman kalibrointia. Erityisesti valumaker-toimen C käyttöön rationaalista menetelmää käytettäessä tulisi kiinnittää huomiota sillä, esimerkiksi Pennington et al. 2018 ovat artikkelissaan todenneet, että kirjallisuudessa yleisesti esitetyt kalibroidut valumakertoimet vastaavat yleensä ainoastaan tilannetta, jollain sateen kesto on sama kuin viipymä.

Mallin kalibroimattomuuden aiheuttamien mahdollisten virheiden lisäksi mallinnuksessa voi esiintyä myös mallin rakenteeseen ja laskentaan liittyviä virheitä (Ewen et al. 2006). Malli voidaan rakentaa monella eri tavalla. Esimerkiksi varalaskupaikan tapauksessa ojan mallinnus olisi voitu tehdä eri tavalla tai ojan olisi voinut jättää myös kokonaan huomioimatta. Mallin laskennallinen epävarmuus voi tulla esimerkiksi esille virtauksen mallintamisessa dynaamisella aaltoliiketylöllä, sillä vaikka menetelmä on teoreettisesti tarkin ja monipuolisin, siinä voi esiintyä numeerista epästabiiliutta.

Myös valuma-alueiden määrittelytarkkuus ja mallin rakentamisen tarkkuus vaikuttavat saatuihin tuloksiin. Tässä työssä valuma-alueet jaettiin hyvin yksityiskohtaisesti omiksi osavaluma-alueiksi. Mitä tarkemmin valuma-alueet jaotellaan, sitä tarkemmin voidaan ottaa huomioon valuma-alueiden ominaisuudet. Toisaalta valuma-alueiden määrittely on hyvin työlästä ja mitä tarkemmin se tehdään, sitä enemmän tarvitaan lähtötietoja. Käytännössä esimerkiksi pintojen kaltevuuden huomioiminen näin tarkalla tasolla voi olla mahdotonta isoilla luonnonmukaisilla valuma-alueilla lähtötietojen puutteen vuoksi. Valuma-alueet voitaisiin määrittellä myös paljon karkeammalla tasolla, mikäli suunnitteluvaihe ei edellytä vielä järjestelmien tarkkaa mitoitusta.

Hule- ja kuivatusvesien mallinnus vaatii mallintajalta melko syvällistä ymmärrystä ja osaamista muun muassa hydrologiasta, valuma-alueiden määrittelystä, mallinnuksessa käytettävistä lähtötiedoista, laskentamenetelmistä ja parametreista sekä mallinnusohjelman toiminnasta. Puutteellinen ymmärrys mallin teoreettisesta taustasta voi johtaa suuriinkin virhetuloksiin kuten esimerkiksi Badea et al. 2002 on artikkelissaan todennut. Myös mallintajan perehtyneisyys mallinnuksen teoreettiseen taustaan on siis tärkeää sekä mallinnustulosten luotettavuuden että mallintamisen sujuvuuden kannalta.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Luvussa käydään ensin läpi työssä saavutetut keskeisimmät tavoitteiden mukaiset tutkimustulokset. Tämän jälkeen esitetään vielä muita työssä esille tulleita huomioita ja esitetään jatkotutkimustarpeita.

### 6.1 Tulosten yhteenveto

Sekä rationaalisella menetelmällä, että SWMM-menetelmällä saadaan laskettua kuivatusrakenteiden mitoituksessa käytettävä huippuvirtaama SSA-ohjelmalla. Huippuvirtaamat lentokoneen varalaskupaikan valuma-alueelta olivat samaa suuruusluokkaa rationaalisella menetelmällä ja SWMM-menetelmällä laskettuina. SWMM-menetelmällä lasketut huippuvirtaamat olivat suurempia asfalttialueelta, kun taas rationaalisella menetelmällä lasketut huippuvirtaamat suurempia päällystämättömiltä alueilta. Tulosten oikeellisuutta ei voitu työssä tutkia, koska mittauksia sadanta-valuntatapahtumasta ei työssä suoritettu. Mallinnustulosten luotettavuuden kannalta valunta- ja virtausmallin kalibrointi ja validointi olisi tärkeää. Menetelmien laskentatulosten tarkka vertailu ei ole välttämättä järkevää, sillä menetelmät eroavat rakenteellisesti ja myös käyttötarkoitukseltaan toisistaan. Kirjallisuudesta ei löytynyt yhtään tutkimusta, jossa olisi vertailu näiden kahden menetelmän tuloksia keskenään. Rationaalinen menetelmä on kehitetty jo 1800-luvulla nimenomaan huippuvirtaamien arviontiin käsin laskemalla, kun taas SWMM-menetelmällä voidaan mallintaa tietokoneavusteisesti ja kokonaisvaltaisesti valuntaa ja virtaukseen liittyviä ilmiöitä.

Kuivatusjärjestelmien mitoitus mallinnusohjelmalla ei onnistu täysin nykyisen ohjeistuksen mukaisesti johtuen esimerkiksi laskennallisista eroista ohjeistuksen ja mallinnusohjelman välillä. Rumpujen mitoituksessa käytettäviä mitoituspadotuskorkeuksia voidaan kuitenkin vertailla virtausmallilla laskettuihin solmupisteiden maksimivedenkorkeuksiin, ja ohjeistuksen mukaisia mitoitusasteita voidaan käyttää mallinnusohjelmalla.

Väyläviraston ohjeistuksessa käytetyn rationaalisen menetelmän etuna on sen yksinkertaisuus. Huippuvirtaama saadaan laskettua valuma-alueen koon ja valumakertoimen avulla. Rationaaliseen menetelmään liittyy paljon oletuksia ja rajoituksia, jotka täytyy ottaa huomioon sitä käytettäessä. Vaikka mallinnusohjelmalla pystytään laskemaan huippuvirtaama käyttäen rationaalista menetelmää, ei menetelmän käyttöä huleveden mää-

rän arviointiin, tai valuntakäyrän syöttämistä virtausmalliin ei yleensä suositella. Rationaalisen menetelmän käyttö mallinnusohjelmalla ei tuo siis välttämättä lisähyötyjä verrattuna perinteiseen mitoitukseen.

Sekä valuma-alueilta muodostuneen valunnan, että kuivatusjärjestelmissä tapahtuvan virtauksen mallintaminen onnistui pohjavedensuojausalueella moottoritien eritasoliittymässä sekä lentokoneen varalaskupaikalla moottoritiellä käyttämällä mallinnusohjelmalla SWMM-menetelmää ja dynaamista aaltoyhtälöä. SWMM-menetelmällä pystytään kuvaamaan tarkemmin valuma-alueiden ominaisuuksia, kuin rationaalisella menetelmällä. Valuma-alueista tarvitaan tällöin myös enemmän lähtötietoja. Mitoitussateena pystyttiin SSA-ohjelmassa SWMM-menetelmää käytettäessä käyttämään tasaisen intensiteetin sateen lisäksi myös vaihtuvaintensiteettisiä sateita, mikä mahdollistaa paremmin ilmastomuutoksen vaikutusten huomioimisen mitoituksessa.

SWMM-menetelmällä tuotettu valuntakäyrä voidaan johtaa virtausmalliin, jolla voidaan tarkastella monimutkaisiakin kuivatusjärjestelmiä. Virtausmallia voidaan hyödyntää esimerkiksi eri mitoitusvaihtoehtojen tarkastelussa. Erityisesti dynaaminen aaltoyhtälö virtauslaskennassa tuo etuja verrattuna nykyisen ohjeistuksen mukaisiin mitoituskäytäntöihin, sillä sen avulla voidaan huomioida monimutkaisiakin virtausilmiöitä, kuten paineelista virtausta takaisinvirtausta sekä nielu- ja purkautumishäviöitä. Mallinnusohjelman käytössä merkittävänä hyötynä on myös mahdollisuus tarkastella mallinnuksen tuloksia hyvin monipuolisesti kuivatusjärjestelmän eri pisteissä. Eri mitoitustapahtumien ja mitoitusvaihtoehtojen tarkastelu voi vähentää riskiä kuivatusjärjestelmien ali- ja ylimitoitukseen.

Mallinnuksella voidaan saada merkittäviä etuja verrattuna perinteiseen kuivatussuunnitteluun erityisesti monimutkaisissa järjestelmissä ja riskialttiissa kohteissa. Mallinnuksen tarpeellisuutta suunnittelussa tulee harkita tapauskohtaisesti ja ottaa huomioon esimerkiksi suunnitteluvaihe, käytettävissä olevat lähtötiedot ja resurssit, kohteen monimutkaisuus ja tärkeys sekä mallinnuksen tavoitteet.

## 6.2 Muut huomiot ja jatkotutkimustarpeet

Ilmastomuutos tulee vaikuttamaan sateisiin ja erityisesti sateiden rankkuus kasvaa tulevaisuudessa. Nykyisessä Väyläviraston Teiden ja Ratojen kuivatus -ohjeessa ilmastomuutos on huomioitu mitoitussateiden toistuvuuden ohjearvoissa, joka vaikuttaa mitoituksessa käytettävään mitoitussateen keskimääräiseen intensiteettiin. Sadetapahtuman suurin hetkellinen intensiteetti voi olla kuitenkin huomattavasti suurempi, kuin keskimääräinen intensiteetti. Keskimääräisten intensiteettien käyttö mitoitustapauksena

saattaa lisätä kuivatusjärjestelmien alimitoituksen riskiä ja tulevaisuudessa saattaa olla tarpeen tarkastella kuivatusjärjestelmien toimivuutta myös vaihtuvaintensiteettisillä sateilla. Vaihtuvaintensiteettisten sateiden käyttöä väylien kuivatusjärjestelmien mitoituksessa kannattaisi tutkia lisää. Vaihtuvaintensiteettisten sateiden käytössä on paljon mahdollisuuksia, esimerkiksi synteettiset mitoittussateet, kuten Chicago Design Storm, tai eri muotoiset hyetografit. Vaihtoehtona on myös käyttää todellisia sadetapahtumia, kuten tässä työssä tehtiin. Tässä työssä tehdyissä esimerkkikohteiden tarkastelussa huomattiin, että intensiteetiltään suurin sade ei kuitenkaan aina aiheuta suurinta tulvimista, vaan myös pitkäkestoisempi ja intensiteetiltään matalampi sade (toistuvuudeltaan yhtä harvinainen) voi aiheuttaa vakavampaa tulvimista sademäärän ollessa kokonaisuudessaan suurempi.

Hulevesien hallintarakenteiden mitoitukseen ei ole nykyisessä Väyläviraston ohjeistuksessa esitetty ohjeita, vaikka niiden käyttöä on esitetty tulvahuippujen riskinarvioinnissa rajoittamistoimenpiteenä. Viivytys- imeytys- ja suodatusjärjestelmien mitoituksessa huleveden määrä huomioidaan mitoittustilavuutena. Rationaalisen menetelmän käyttäminen altain tilavuuden mitoittamisessa ei ole kirjallisuuslähteiden mukaan suositeltavaa, koska menetelmä on tarkoitettu ainoastaan huippuvirtaaman määrittämistä varten. Huleveden määrää voidaan selvittää esimerkiksi SWMM -menetelmällä, joka sisältää myös työkaluja esimerkiksi hallintarakenteiden mitoitukseen (ei tutkittu tässä työssä).

SWMM-menetelmää käyttäen mallinnusohjelmassa on vielä valtavasti käyttömahdollisuuksia väyläsuunnittelun tarpeisiin, joita ei tämän työn yhteydessä ollut mahdollisuus tutkia. Esimerkiksi lumien sulamisen ja hulevesien hallintarakenteiden (esimerkiksi viivytys- ja laskeutusaltaiden) ja veden laadun mallintaminen olisivat mielenkiintoisia lisätutkimusmahdollisuuksia.

## 7. LÄHTEET

Aaltonen J., Hohti H., Jylhä K., Karvonen T., Kilpeläinen T., Koistinen J., Kotro J., Kuitunen T., Ollila M., Parvio A., Pulkkinen S., Silander J., Tiihonen T., Tuomenvirta H. & Vajda A. (2008). Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU), Helsinki.

ASCE (American Society of Civil Engineers) (1992). Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems - ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 77.

Autodesk® (2017). User's Guide. Autodesk® Storm and Sanitary Analysis 2018.

Badea G., Bacoțiu C. (2002). A comparison of the various methods used worldwide for the stormwater systems design. International council for research and innovation in building and construction. Saatavissa: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB21859.pdf>

Barbosa L., Almeida C., Coelho V., Freitas E., Galvao C., Araujo J. (2018). Sub-hourly rainfall patterns by hyetograph type under distinct climate conditions in Northeast of Brazil: a comparative inference of their key properties. Brazilian Journal of Water Resources. Saatavissa: <http://www.scielo.br/pdf/rbrh/v23/2318-0331-rbrh-23-e46.pdf>

Brown S., Schall J., Morris J., Doherty C., Stein S., Warner J. (2013). Urban Drainage Design Manual. Hydraulic Engineering Circular 22. FHWA (Federal Highway Administration) Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/10009/10009.pdf>

Butler D., Davies J. (2004). Urban drainage. 2. Edition. Spon Press. Lontoo ja New York.

El-Sayed E. (2017). Development of synthetic rainfall distribution curves for Sinai area. Ain Shams Engineering Journal, Vol 9, Issue 4, p. 1949-1957. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447917300114#b0050>

EPA (United States Environmental Protection Agency) (2019). Storm Water Management Model (SWMM), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.7.2019): <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Ewen J., O'Donnel G., Burton A., O'Connell E. (2006). Errors and uncertainty in physically-based rainfall-runoff modelling of catchment change effects. Journal of Hydrology, Vol 330, issues 3-4.

Gironás J., Roesner L., Davis J., (2009). Storm Water Management Model Applications Manual. Saatavissa: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P100EA7H.txt>

Government of Western Australia (2019). The Rational Method. Document No: 67-08-73. Saatavissa: [https://www.mainroads.wa.gov.au/BuildingRoads/StandardsTechnical/RoadandTrafficEngineering/DrainageWaterways/DesignFlows/Pages/The\\_Rational\\_Method.aspx](https://www.mainroads.wa.gov.au/BuildingRoads/StandardsTechnical/RoadandTrafficEngineering/DrainageWaterways/DesignFlows/Pages/The_Rational_Method.aspx)

Huber W., Rossman L. (2016). Storm Water Management Model, Reference Manual, Volume I -Hydrology. United States Environmental Protection Agency.

Ilmatieteen laitos (2016). Ilmastomuutos sekoittaa Suomen vesipalettia, Ilmasto-opas, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.7.2019): <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/vai-kutukset/-/artikkeli/a0596a76-eb8b-45e7-ab51-9bc6149f7312/ilmastonmuutos-sekoit-taa-suomen-vesipalettia.html>

Ilmatieteen laitos (2017a). Sademäärät kasvavat ja rankkasateet voimistuvat, Ilmasto-opas, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.1.2019): <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/27922915-7ee5-4122-ae60-51f58e6aef9a/sa-demaarat-kasvavat.html>

Ilmatieteen laitos (2017b). Mitoitussateiden muotokirjasto, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.2.2019): <https://ilmasto-opas.fi/fi/datat/mitoitussateiden-muotokirjasto>

Ilmatieteen laitos a. Nykyinen ilmasto - 30 vuoden keskiarvot, Ilmasto-opas, verkkosivu. Saatavissa (Viitattu 17.2.2019): <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/1c8d317b-5e65-4146-acda-f7171a0304e1/nykyinen-ilmasto-30-vuoden-keskiarvt.html>

Ilmatieteen laitos b. Kuukausitilastot, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.2.2019): <https://ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot>

Johnson P., McCuen R., Ragan R. (2002). Highway Hydrology, Hydraulic Design Series Number 2, 2nd Edition. Federal Highway Administration (FHWA). Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif02001.pdf>

Jämsén J. (2017). Valuma-alueen määrittäminen –työkalu –tulosten tulkinta ja muokkaus. Suomen Ympäristökeskus. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/vesiensuojelutyokalu-valuma-alueen-maaritys-tulosten-tulkinta.pdf>

Järvenpää L. & Savolainen M. (2016). Silta- ja rumpurakenteiden aukkomittoitus, Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus.

Kalantari Z., Folkesson L. (2013). Road Drainage in Sweden: Current Practice and Suggestions for Adaptation to Climate Change. ASCE, Journal of Infrastructure Systems, Vol 19, Issue 2. Saatavissa: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IS.1943-555X.0000119>

Kalantari Z., Jansson P.-E., Stolte J., Folkesson L., French H.K., Sassner M. (2012). Usefulness of four hydrological models in simulating high-resolution discharge dynamics of a catchment adjacent to a road. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Vol 9, p. 5121-5165. Saatavissa: <https://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/9/5121/2012/hessd-9-5121-2012.pdf>

Karttunen E. (2003). RIL 124-1 Vesihuolto I, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki.

Karttunen E. (2004). RIL 124-2 Vesihuolto II, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki.

Kramer G. (2015). Climate and Change and Culvert Sizing in Norway. Konferenssimateriaali. Saatavissa: <http://www.cts.umn.edu/sites/default/files/files/sessions/25kramer.pdf>

Kuosa H., Niemeläinen E., Holt E., Forstén L., Määtänen A. (2015). Vettä läpäisevät päällysteet: hulevesien hallinta ja liikennöitävyys. Artikkel, Tie & Liikenne. Saatavissa: [https://issuu.com/tieyhdistys/docs/tl\\_4-15](https://issuu.com/tieyhdistys/docs/tl_4-15)



- Leppävirta, M., Virta, J. & Huttula, T. (2017). Hydrologian perusteet, Unigrafia, Helsinki
- Liikennevirasto (2013a). Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu, Helsinki, Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo\\_2013-05\\_teiden\\_ja\\_ratojen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2013-05_teiden_ja_ratojen_web.pdf)
- Liikennevirasto (2013b). Tien rakennussuunnitelma – sisältö ja esitystapa, Helsinki. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo\\_2013-44\\_tien\\_rakennussuunnitelma\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2013-44_tien_rakennussuunnitelma_web.pdf)
- Mays L. (2001). Stormwater Collection Systems Design Handbook, McGraw-Hill
- Minnesota Pollution Control Agency (2017). Minnesota Stormwater Manual, verkkosivu Saatavissa (viitattu 15.2.2019): [https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Available\\_stormwater\\_models\\_and\\_selecting\\_a\\_model](https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Available_stormwater_models_and_selecting_a_model)
- Minnesota Stormwater Steering Committee (2005). The Minnesota Stormwater Manual, 1st ed. Minnesota Pollution Control Agency
- Moore M., Vasconcelos J., Wesley C. (2017). Modeling Highway Stormwater Runoff and Groundwater Table Variations with SWMM and GSSHA. Journal of Hydrologic Engineering, Vol 22, Issue 8. Saatavissa: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001537>
- Moss R., Edmonds J., Hibbard K., Manning M., Rose S., van Vuuren D., Carter T., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G., Mitchell J., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S., Stouffer R., Thomson A., Weyant J., Wilbanks T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature vol 463, p. 747-756. Saatavissa: <http://www.nature.com/nature/journal/v463/n7282/full/nature08823.html>
- Rimpiläinen L. (2017). Tutkapohjainen mitoitusateiden muotokirjasto, diplomityö, Aalto-yliopisto, 49 p. Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/25136/master\\_Rimpil%c3%a4inen\\_Larissa\\_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/25136/master_Rimpil%c3%a4inen_Larissa_2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Rossman L. (2015). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. United States Environmental Protection Agency
- Rossman L. (2017). Storm Water Management Model, Reference Manual, Volume II - Hydraulics. United States Environmental Protection Agency
- Ruosteenoja K., Jylhä, K., Kämäräinen M. (2016). Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. Geophysica, Vol 51, Issue 1: 17–50. Saatavissa: [http://www.geophysica.fi/pdf/geophysica\\_2016\\_51\\_1-2\\_017\\_ruosteenoja.pdf](http://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2016_51_1-2_017_ruosteenoja.pdf)
- Saarinen S., Makkonen L. (2007). Ilmastonmuutokseen sopeutuminen tienpidossa, esiselvitys, Tiehallinto, Helsinki. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/139344/4549tie.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salaojayhdistys (2013) Hydrologian perusteet ja maan vesitalous. Saatavissa: [http://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2016/05/hydrologian\\_perusteet\\_ja\\_maan\\_vesitalous\\_2013-2.pdf](http://www.salaojayhdistys.fi/wp-content/uploads/2016/05/hydrologian_perusteet_ja_maan_vesitalous_2013-2.pdf)
- Salimi E., Nohegar A., Malekian A., Hoseini M., Holisaz A. (2015). Estimating time of concentration in large watersheds. The International Society of Paddy and Water Environment Engineering and Springer Japan, Vol. 15 p.123-132

Schall J., Thompson P., Zerges S., Kilgore R., Morris J. (2012). Hydraulic Design of Highway Culverts. 3rd edition. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA)

Sikiö M. Johtava konsultti, Diplomi-insinööri, Destia Oy, Haastattelu 28.5.2019

State of New Jersey (2004). New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual, Chapter 5: Computing Stormwater Runoff Rates and Volumes. Saatavilla: [https://www.state.nj.us/dep/stormwater/bmp\\_manual/NJ\\_SWBMP\\_5%20print.pdf](https://www.state.nj.us/dep/stormwater/bmp_manual/NJ_SWBMP_5%20print.pdf)

Suomen kuntaliitto (2012). Hulevesiopas, Helsinki, Saatavissa: <http://shop.kuntaliitto.fi/download.php?filename=uploads/hulevesiopas-2012.pdf>

Tiehallinto (2009a). Ympäristövaikutusten arviointi tiehankkeiden suunnittelussa. Helsinki. Saatavissa: <https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2000027-v-09-yva-ohje.pdf>

Tiehallinto (2009b) Tiesuunnitelmavaiheen asiakirjat - Sisältö ja esitystapa. Helsinki. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100060-v-09-tiesuunnitelmavaiheen\\_asiakirjat.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100060-v-09-tiesuunnitelmavaiheen_asiakirjat.pdf)

Tourula T., Häyrynen V., Pilli-Sihvola E., Mynttinen S. (2018). Tavoitteena toimiva arki - tulevaisuuden toimintavarma liikennejärjestelmä 2030. Trafin tutkimuksia 9/2018. Saatavissa: [https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1525678895/d5b3ba9430e8e922e0e857f91e150a52/30408-Trafi\\_09\\_2018\\_Tavoitteena\\_toimiva\\_arki\\_-\\_tulevaisuuden\\_toimintavarma\\_liikennejarjestelma\\_2030.pdf](https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1525678895/d5b3ba9430e8e922e0e857f91e150a52/30408-Trafi_09_2018_Tavoitteena_toimiva_arki_-_tulevaisuuden_toimintavarma_liikennejarjestelma_2030.pdf)

U.S. Army Corps of Engineer (2019). HEC-RAS, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.2.2019): <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/features.aspx>

UDFCD (Urban Drainage and Flood Control District) (2018). Urban Storm Drainage Criteria Manual Volume 1. Management, Hydrology and Hydraulics. Chapter 6 Runoff. Saatavissa: [https://udfcd.org/wp-content/uploads/2018/10/06\\_Runoff-August-2018.pdf](https://udfcd.org/wp-content/uploads/2018/10/06_Runoff-August-2018.pdf)

Vakkilainen P., Kotola J. & Nurminen J. (2005). Rakennetun ympäristön valumavedet ja niiden hallinta, Edita Prima Oy, Helsinki.

Veijalainen N., Jakkila J., Nurmi T., Vehviläinen B., Marttunen M., Aaltonen J. (2012). Suomen vesivarat ja ilmastomuutos – vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen, SYKE.

Vägverket (2008). VVMB 310 Hydraulisk dimensionering. Saatavissa: [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11208/RelatedFiles/2008\\_61\\_vvmb\\_310\\_hydraulisk\\_dimensionering.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/11208/RelatedFiles/2008_61_vvmb_310_hydraulisk_dimensionering.pdf)

Väylävirasto (2018). Vt 4 Kirri-Tikkakoski, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.3.2019): <https://vayla.fi/vt4-kirri-tikkakoski#.XIIQjSgzZPb>

Väylävirasto (2019a). Pohjaveden suojelu maanteillä. Julkaisematon luonnos.

Väylävirasto (2019b) Hankkeiden suunnittelun vaiheet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.4.2019): <https://vayla.fi/hankkeiden-suunnittelu/hankkeiden-suunnittelun-vaiheet#.XLhEMOgzZPY>

Zuppou C. (2001). Review of urban storm water models. Environmental Modelling & Software, Vol 16, p. 195–231.